DVB-T e T2
Digital Terrestrial Television

Serie di articoli, pubblicati in più numeri di Elettronica e Telecomunicazioni, trattano e approfondiscono una singola tematica. Lo scopo dell'iniziativa **LeMiniSerie** è di raccogliere tali articoli, con una veste tipografica unitaria che ne faciliti la consultazione.

Questo è l'ottavo volume.

"DVB-T e T2, Digital Terrestrial Television" raccoglie 16 articoli pubblicati da dicembre 1999 ad aprile 2012.

LeMiniSerie sono una iniziativa del
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della

www.crit.rai.it

In copertina:
Centro Trasmittente RaiWay di Torino Eremo

Il Centro Ricerche da sempre promuove lo sviluppo e la sperimentazione dei sistemi e dei servizi diffusivi digitali e numerosi articoli pubblicati su Elettronica e Telecomunicazioni sono stati dedicati ai temi della normalizzazione e realizzazione dei sistemi di diffusione terrestre, sviluppati nell'ambito del progetto DVB.

Il progetto DVB (Digital Video Broadcasting) è un consorzio che attualmente conta più di 260 partecipanti tra radiodiffusori, operatori di reti, industrie e sviluppatori software, enti di regolamentazione provenienti da più di 35 paesi. Ha lo scopo di definire gli standard per la diffusione dei servizi televisivi e dati. Sono più di 120 milioni i ricevitori DVB installati a livello mondiale.

Questa raccolta comprende 16 articoli pubblicati dal 1999 al 2012 sulla televisione digitale terrestre e sugli standard DVB-T e DVB-T2.

Il DVB-T è il sistema DTT (Digital Terrestrial Television) di diffusione televisiva digitale terrestre maggiormente adottato nel mondo, in 60 paesi con più di 200 milioni di ricevitori installati. Il 4 luglio 2012 si è concluso il percorso, durato quattro anni, che ha portato l'Italia, regione dopo regione a partire dalla Sardegna, a passare dalla televisione analogica, quella che l'aveva accompagnata fin dal 1954 (anno in cui partirono le prime trasmissioni ufficiali), al digitale terrestre. L'ultimo switch-off ha visto lo spegnimento del segnale analogico dai ripetitori di Monte Pellegrino e che ha avuto per protagonista l'area di Palermo città e di alcuni comuni limitrofi.

DVB - Digital Terrestrial Television

Il percorso proseguità con l'introduzione del cosiddetto "digitale terrestre di seconda generazione", DTT che sfrutta le potenzialità dello standard DVB-T2 (Digital Video Broadcasting-Terrestrial 2).

L'introduzione del DVB-T2 aprirà nuove possibilità, dato che a parità di banda trasmissiva impiegata si potrà lanciare un'offerta in alta definizione più estesa, superando così i limiti imposti dallo standard attuale. Il nuovo standard non è retro-compatibile, cioè non è possibile con un decoder o un televisore con decoder integrato DVB-T ricevere i canali modulati secondo lo standard di seconda generazione.

La Rai ha già chiesto le autorizzazioni ministeriali per iniziare la sperimentazione nel nuovo standard dalle principali postazioni regionali. Tutte queste trasmissioni saranno sul canale 11 VHF, in modo da essere ricevute da tutte le antenne già puntate per ricevere il multiplex 1 della Rai. I programmi trasmessi dovrebbero essere gli attuali Rai1, Rai2 e Rai3, ma tutti in versione HD. Non vi è ancora nessuna previsione per l'inizio della sperimentazione.

Torino, dicembre 2012

Indice degli Articoli

Prospettive per l'introduzione della televisione digitale terrestre in Italia

M. Cominetti,
A. Morello,
R. Serafini*

*Dr. Mario Cominetti
Consulente RAI.
Ing. Alberto Morello
Rai - Centro Ricerche
e Innovazione Tecnologica -
Torino
Ing. Roberto Serafini
della Divisione
Trasmissione
e Diffusione RAI.

Dattiloscritto pervenuto
alla Redazione
il 28 ottobre 1999.

La televisione digitale terrestre (DTT) svolgerà un ruolo primario nello scenario dei nuovi servizi dell'era digitale. La DTT introduce una maggiore competizione all'interno dell'attuale sistema televisivo digitale, dominato dal satellite e dal cavo, ed una maggiore e diversificata scelta di servizi. Il nuovo quadro di riferimento istituzionale per la radiodiffusione costituisce la base per l'avvio e lo sviluppo della DTT nel nostro paese in uno scenario caratterizzato dalla occupazione generalizzata dello spettro televisivo. L'articolo esamina gli elementi salienti del processo in corso, ed illustra il piano di sperimentazione sulla DTT presentato dalla RAI nell'ambito del Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali. Riporta inoltre i primi risultati delle sperimentazioni effettuate sul "test bed" di Torino.

PERSPECTIVES FOR THE INTRODUCTION OF DIGITAL TERRESTRIAL TELEVISION IN ITALY. Digital Terrestrial Television (DTT) will have a leading role to play in the panorama of communication media in the digital era, as it has in the analogue one. DTT introduces more competition into the existing television markets, offers more consumer choice and release valuable frequency spectrum, and last, but not least, satisfies the desire expressed at European and national level to protect cultural identity and, within that, public service broadcasting. In this context, the new Italian regulatory framework opens the door for the introduction of DTT in a particularly critical environment characterised by a densely utilised frequency spectrum. The paper highlights the key issues of the RAI's pilot trials carried out in the framework of the DTT National Committee, and reports the first results achieved in the Turin test bed.

1. Introduzione

Alla soglia dell'anno 2000, le tecnologie digitali sviluppate in ambito al Consorzio europeo DVB si stanno rapidamente affermando su tutti gli anelli della catena di radiodiffusione, dalla generazione dei programmi alla distribuzione all'utente sui vari media: satellite, cavo, terrestre.

La tecnologia digitale offre nuove opportunità per i fornitori dei servizi, i gestori di rete e l'industria del settore in un mercato caratterizzato dalla convergenza fra Radiodiffusione, Telecomunicazioni e Informatica. Essa rappresenta la soluzione globale alla domanda crescente di nuovi servizi televisivi generalisti e tematici, in chiaro e a pagamento, e consente un miglioramento della qualità audio-video, l'introduzione del formato panoramico (16:9), di servizi Internet, multimediali e interattivi. L'accesso alla nuova e diversificata offerta sarà possibile attraverso la Guida Elettronica ai Programmi (EPG), una specie di radiocorriere visualizzato sullo schermo del televisore che consente all'utente di scegliere il programma desiderato "navigando" all'interno del "bouquet" mediante il telecomando.

In questo contesto fortemente evolutivo la televisione digitale terrestre, nello standard DVB-T, è destinata a svolgere un ruolo centrale a motivo della sua facilità ed economicità di ricezione ed alla "universalità" del servizio stesso, rivolto prevalentemente al grande pubblico. Essa potrà inoltre integrare l'offerta dei canali satellitari e via cavo potendo soddisfare le diverse tipologie dei servizi nazionali, regionali e locali.
La DTT consente altresì di ottimizzare l'utilizzazione del canale, offrendo vari benefici:

- "miglior compromesso"fra qualità audio-video e capacità trasmissiva, a seconda dei requisiti di servizio
- possibilità di utilizzare gli attuali sistemi di ricezione individuali e condominiali con limitati costi addizionali per l'utenza;
- possibilità di ricezione con apparati fissi, portatili e mobili (su autobus, treni, ecc.).

La disponibilità sul mercato di ricevitori commerciali, sia in versione Set-Top-Box (STB) che in versione di televisore integrato (IDTV), e basati sulla futura piattaforma multimediale domestica DVB-MHP (Multimedia Home

Platform), è una condizione essenziale per il successo della DTT. La specifica tecnica è in fase avanzata di definizione da parte del DVB.
Per quanto riguarda in particolare il nostro Paese, al di là della necessità di rendere disponibili nel breve-medio termine adeguate risorse in frequenza, sarà necessario soddisfare almeno tre requisiti essenziali emersi in ambito ai lavori del Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali, costituito dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni:

- servizi a copertura sia nazionale che regionale o locale;
- offerta di nuovi servizi per fronteggiare la concorrenza con il satellite e il cavo;
- ritrasmissione in "simulcasting" di programmi analogici onde accelerare la transizione alla soluzione digitale.

2. Lo scenario nazionale

In Italia l'offerta televisiva è distribuita al grande pubblico, dagli operatori nazionali e locali, attraverso le attuali reti terrestri analogiche nelle bande di frequenza III (VHF), IV e V (UHF). L'occupazione dei canali a radiofrequenza è molto vicina alla saturazione, rendendo molto difficile il reperimento di risorse per la DTT.

La diffusione televisiva da satellite, nello standard DVB-S, si è sviluppata a partire dal 1995 quando fu introdotto da Eutelsat il satellite HotBird-1 (a 13°E), con copertura paneuropea, che ha consentito una ricezione uniforme su tutto il territorio nazionale con antenne da 60÷90 cm.
Successivamente, sulla stessa posizione orbitale, è stato lanciato il satellite HotBird-2, di cui due transponditori (52 e 54) forniscono il "bouquet" digitale di programmi "free-to-air" della RAI. Attraverso lo stesso satellite Telepiù/D+ e Stream forniscono le rispettive offerte di canali tematici "pay" e "pay-per-view". A 19,2°E sono posizionati i satelliti di Astra che, pur consentendo una buona copertura dell'Italia, diffondono principalmente programmi in lingua tedesca prevalentemente orientati all'utenza dell'Europa Centrale.
Oggi più di 2 milioni di parabole sono installate nel nostro Paese per la ricezione satellitare dei programmi analogici e digitali. Il parco dei ricevitori digitali ammonta a circa 1,5 milioni di unità ed è in continua crescita.
L'esperienza fin qui acquisita dagli installatori e dagli operatori del settore ha dimostrato che lo sviluppo della televisione digitale da satellite dipende fortemente dalla possibilità di estendere, su vasta scala, la ricezione negli impianti centralizzati di antenna (SMATV), specialmente nelle città e nelle aree di interesse storico e architettonico, dove, fra l'altro, si incontrano spesso difficoltà connesse alle valutazioni di impatto ambientale. Purtroppo gran parte dei vecchi impianti condominiali, progettati per la ricezione dei segnali analogici PAL, richiede interventi elevati per l'adeguamento alla tecnologia digitale.

Lo scenario nazionale dei servizi via cavo assume, allo stato attuale, una rilevanza secondaria. Le grandi reti in cavo non esistevano fino al giugno del 1995, quando Telecom Italia lanciò il "Programma Socrate". Oggi, nonostante la ricca e diversificata offerta fornita sin dall'inizio da Stream, il servizio non si è sviluppato secondo le previsioni, anche a causa della difficoltà di interconnessione degli utenti alle reti in cavo.

L'ampia offerta attuale di canali televisivi sulle reti terrestri e via satellite potrebbe non rendere immediatamente percepibile al pubblico i vantaggi della DTT, vanificando gli sforzi dei vari operatori nel promuovere il

lancio dei nuovi servizi; pertanto una politica di transizione verso il digitale, basata principalmente sulla ritrasmissione (simulcasting) dei programmi TV analogici, non sembra proponibile. Tutti gli operatori (broadcaster, gestori di rete, industria) concordano quindi sulla necessità di arricchire e diversificare l'offerta con nuovi programmi televisivi e multimediali, "free-to-air" e "pay", piuttosto che puntare sulla "qualità" della codifica dell'immagine e del suono, a scapito della "quantità" dei programmi. Ciò dovrebbe rappresentare un elemento trainante nell'indirizzare il consumatore verso la tecnologia digitale, auspicando inoltre che vengano introdotti sgravi fiscali per l'acquisto dei nuovi ricevitori.

3. Il quadro di riferimento

L'assenza di una regolamentazione del sistema radiotelevisivo ha caratterizzato il panorama italiano sin dagli anni '70 quando gli operatori commerciali, nazionali e locali sono entrati sul mercato utilizzando in modo scoordinato le risorse in frequenza reperibili sul territorio. Nel 1990, fu compiuto da parte del Ministero PT un importante passo per razionalizzare l'utilizzazione dello spettro attraverso la definizione di un Piano di assegnazione delle Frequenze per i servizi televisivi che fu approvato a gennaio del 1992, ma che però non ha trovato pratica attuazione anche per la forte opposizione degli operatori privati. Nel 1993, vennero concesse circa 700 autorizzazioni temporanee agli operatori privati del settore televisivo.

Nel luglio 1997, pochi giorni dopo la Conferenza della CEPT di Chester (Bibl. 1) per l'introduzione della televisione digitale terrestre in Europa, fu emanata la nuova Legge 249/1997 che, seppur focalizzata sull'istituzione dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, estende globalmente le sue competenze anche alla radiodiffusione, definendo i criteri base della ripianificazione TV.

L'Autorità è concepita dalla Legge come l'organismo regolatore nel campo delle telecomunicazioni e della radiodiffusione, sia in tecnologia analogica che digitale. Nel settore della radiodiffusione l'Autorità approva i piani nazionali di assegnazione delle frequenze (con la collaborazione del Ministero delle Comunicazioni), tiene il registro degli operatori di tutti i settori (radio, televisione, telecomunicazioni, editoria) e promulga gli standard per i nuovi decodificatori/ricevitori digitali televisivi domestici.

Il Decreto Legge 15/1999 regola il rilascio delle concessioni agli operatori nazionali e locali. Per effetto del Decreto, è consentito agli operatori dei servizi di tele-vendita di continuare l'utilizzazione delle frequenze terrestri purchè si impegnino, entro tre anni dal rilascio delle concessioni delle licenze, a trasferire i relativi programmi sul satellite o sul cavo. La questione più importante sollevata dal Decreto è l'obbligo di introdurre sul mercato nazionale, dal 1° Luglio 2000, soltanto ricevitori digitali TV in grado di ricevere l'offerta di programmi, anche criptati , forniti da qualsiasi operatore.

Il Disegno di Legge 1138, tuttora in discussione in Parlamento, propone di anticipare al 2006 la data per il completamento del processo di transizione dall'analogico al digitale.

3.1 Piano delle frequenze TV

Nel quadro della Legge 249/97, l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni ha definito recentemente un nuovo Piano di Assegnazione delle Frequenze per i servizi televisivi analogici dove:

- il 70% delle frequenze viene assegnato alle reti televisive nazionali;
- il 30% delle frequenze viene assegnato alle reti locali;

- parte dello spettro viene assegnato ai servizi digitali terrestri televisivi (DTT) e radiofonici (DAB).

Il Piano prevede 11 reti analogiche nazionali e 6 programmi regionali/locali. L'area di servizio di ogni trasmettitore è sostanzialmente limitata ai confini delle 21 regioni italiane. Ciascuno dei 487 principali siti trasmittenti individuati dal Piano irradia un gruppo di 17 frequenze (cluster) adottando parametri di trasmissione uniformi.

La copertura prevista per i servizi televisivi analogici nazionali è dell'80% del territorio, a cui corrisponde all'incirca il 92% della popolazione. Per raggiungere tale estensione, in ambiente analogico, si rende necessario sfruttare tecniche di diffusione con offset di precisione, nonchè scegliere opportunamente il diagramma dell'antenna trasmittente oltrechè utilizzare i siti previsti dal Piano.

La realizzazione su vasta scala del nuovo Piano per i servizi TV analogici richiederebbe pertanto significativi investimenti per la costruzione dei nuovi siti e delle infrastrutture di rete e suscita l'opposizione dei broadcaster che non ne riconoscono i reali vantaggi a fronte dell'imminente avvento della soluzione digitale.

Infatti il Piano, anche se sviluppato essenzialmente per la TV analogica, è adatto anche alla DTT, poichè esclude i siti trasmittenti ad alta potenza e situati su posizioni molto elevate; ciò è necessario per consentire l'introduzione di reti digitali a singola frequenza (SFN) e multifrequenza (MFN).

Il nuovo Piano Nazionale delle frequenze assegna ai servizi DTT il canale 9 (canalizzazione europea) in banda III/VHF ed i canali 66, 67, 68 nella banda UHF. Il canale 12 (VHF) è assegnato al DAB, in accordo con le indicazioni CEPT. L'utilizzazione dei canali per la DTT non è ancora definita. Varie ipotesi sono all'esame del Gruppo di lavoro D del Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali (vedi par.3.2). I vari scenari allo studio considerano:

- reti a singola frequenza (SFN) per servizio nazionale;
- reti SFN regionali, dette anche reti K-SFN (dove K= 2;3 è il numero totale di frequenze della rete)[1];
- reti multifrequenza (MFN) per servizio nazionale e regionale.

Per aumentare la capacità della banda VHF è stata pertanto richiesta all'industria nazionale ed all'EACEM (organizzazione dei costruttori europei di prodotti "consumer") la disponibilità di ricevitori digitali dual-band VHF e UHF con sintonizzatore da 7 e 8 MHz. si è considerata la possibilità di convertire la canalizzazione italiana, che comprende 7 canali da 7 MHz, in quella europea che comprende a sua volta 8 canali da 7 MHz (figura 1).

Lo scenario di transizione dall'analogico al digitale potrà essere agevolato dal progressivo passaggio sul satellite degli attuali servizi di pay-TV analogici terrestri e di alcuni canali TV commerciali, secondo quanto stabilito dalla Legge 249/97.

3.2 Comitato nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali

L'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni ha costituito un Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali, che riunisce i principali attori (broadcaster, gestori di rete, industria del settore, centri di ricerca), allo scopo di identificare le condizioni necessarie per il lancio dei servizi DTT e formulare un piano operativo. L'attività è condotta nell'ambito di 4 grup-

[1] Nel caso in cui una rete K-SFN porti lo stesso insieme di programmi, il servizio assume carattere nazionale

pi di Lavoro incaricati di valutare i vari aspetti connessi con l'introduzione della DTT (tecnici, operativi, commerciali, industriali):

- Gruppo A: Individuazione dei requisiti del servizio;
- Gruppo B: Piano di Assegnazione delle Frequenze;
- Gruppo C: Problemi di carattere industriale e di mercato;
- Gruppo D: Proposte operative per l'introduzione e lo sviluppo della DTT.

I Gruppi di lavoro A,B,C hanno il compito di istruire le attività del Gruppo D. Il Gruppo D, si propone di pervenire alla identificazione di uno (o più) scenari operativi per l'introduzione e lo sviluppo dei nuovi servizi DTT a partire dal 2000.

4. Piano di sperimentazione RAI

Nel 1998, nel quadro delle attività previste dal Contratto di Servizio con il Ministero delle Comunicazioni, la RAI ha presentato un piano di sperimentazione tecnica sulla DTT (Bibl. 2) che ora si sta sviluppando in ambito alla attività del Comitato Nazionale per lo Sviluppo dei Sistemi Digitali. Il piano si articola su varie "aree pilota" del territorio nazionale: Roma, Torino e Valle d'Aosta, Palermo, Pisa-Livorno (figura 2). Le sperimentazioni sono condotte in stretta collaborazione tra la Divisione Trasmissione e Diffusione ed il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica. Le modalità di trasmissione si basano sui seguenti parametri di sistema:

- Modulazione 64 QAM; FEC-2/3 (ricezione fissa/portatile) e 16 QAM; FEC-1/2 (ricezione mobile);
- Modalità 2K/8K portanti OFDM;
- Intervallo di guardia (Tg/Tu): da 1/4 a 1/32;
- Bit-rate utile: 24 Mbit/s (ricezione fissa/portatile) e 14 Mbit/s (ricezione mobile)

Fig. 1 - Conversione della canalizzazione VHF (banda III) italiana in quella europea.

Fig. 2 - Aree di sperimentazione RAI della televisione digitale terrestre.

Torino. La sperimentazione, avviata sul canale 28 (UHF), si è focalizzata, in una prima fase, sulla valutazione di alcuni aspetti tecnologici e sistemistici della DTT, quali: qualità di codifica audio/video, efficacia della multiplazione statistica, copertura del servizio con ricezione fissa, portatile e mobile, ricezione negli impianti centralizzati, prestazioni dei ricevitori commerciali, ecc. I risultati delle prime valutazioni hanno consentito di contribuire fattivamente all'attività dei Gruppi di lavoro del Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali.

La piattaforma tecnologica di codifica e multiplazione MPEG-2/DVB è installata presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica. Il segnale digitale a livello di Transport Stream (TS) è inviato, attraverso un collegamento in ponte radio digitale (SDH), al sito trasmittente di Torino-Eremo dove viene effettuata la modulazione OFDM e la successiva diffusione sul canale 28 con una ERP nominale di 300W. Il livello del campo e.m. irradiato consente una copertura del servizio, con ricezione fissa, su tutta l'area urbana e suburbana. E' previsto a breve l'impiego di un altro canale (ch.66 UHF con una maggiore ERP e un'area di copertura più estesa).

La figura 3 fornisce una stima dell'area di copertura del servizio sperimentale DTT.

Valle d'Aosta. Il test-bed, in fase avanzata di realizzazione, prevede l'impiego di un canale UHF e consentirà di valutare le problematiche tecnico-operative connesse a una struttura di rete isofrequenziale (SFN), con 4-5 impianti trasmittenti, nonché gli effetti dovuti alla propagazione, spesso soggetta a riflessioni multiple a causa dell' orografia del terreno, fornendo informazioni utili per la pianificazione del servizio DTT su vasta scala. Lungo l'autostrada A5 verranno valutate le prestazioni del sistema in ricezione mobile, e confrontate con quelle del DAB. La presenza delle valli laterali che si diramano da quella principale permetterà inoltre di valutare l'efficacia di "gap-filler", ossia di piccoli ripetitori DTT isofrequenziali, per estendere l'area di copertura in zone non servite dal trasmettitore principale.

Il "bouquet" DTT sperimentale è generato presso il Centro Trasmittente di

Fig. 3 - Sperimentazione DTT a Torino. Previsioni di copertura con antenna ricevente direttiva.

St.Vincent, che funge da capo-rete, inserendo nel multiplex alcuni programmi RAI ricevuti da satellite, il programma regionale ed altri servizi. Il segnale all'uscita del multiplex viene modulato in OFDM (64QAM e/o 16QAM) e quindi distribuito agli altri trasmettitori della rete attraverso un collegamento in ponte radio analogico (FM) in modalità "pseudo video".
E' prevista in futuro la migrazione verso una distribuzione su collegamenti digitali in ponte radio-SDH, con rete SFN sincronizzata via satellite dai segnali GPS.

Palermo, Roma, Livorno/Pisa. Il test-bed di Palermo è basato su una rete locale mini-SFN con due trasmettitori sul canale 67 UHF che forniscono un'area di copertura urbana/extraurbana. Recentemente la Divisione Trasmissione e Diffusione ha avviato la sperimentazione DTT a Roma sul canale E (VHF) con trasmettitore situato a Monte Mario. Il test-bed nell'area Pisa-Livorno verrà presumibilmente attivato nel corso dell'anno 2000.

5. Primi risultati nell'area torinese

La sperimentazione tecnica si è finora concentrata sulla valutazione dei principali parametri relativi ai criteri di pianificazione del servizio:

- intensità del campo e.m. (dBmV/m) disponibile in area e confronto con le previsioni;
- margine di ricezione (NM) ottenuto attenuando il livello del segnale all'ingresso del ricevitore fino a raggiungere la soglia di degradamento video (QEF);
- tasso di errore (BER);
- rapporto portante / interferente (C/I) nei confronti di segnali analogici PAL.

E' stato attrezzato allo scopo un automezzo equipaggiato con un'antenna logaritmica direttiva (guadagno 6 dB), montata su supporto estensibile (alto 20 m), e un'antenna omnidirezionale. Mediante personal computer sono stati memorizzati nelle varie località i parametri di ricezione forniti dal sistema di misura (campo e.m., margine di ricezione, ecc.) e i dati di posizionamento forniti dal GPS.

La prima campagna di misure si è concentrata principalmente sulla valutazione della copertura del servizio in diverse condizioni di ricezione: impianto singolo con antenna direttiva, ricezione "indoor" con terminale portatile (con e senza ripetitori in banda "gap-filler"), ricezione mobile, ricezione attraverso sistemi di antenna centralizzata (MATV).
Si sono inoltre effettuate prove di laboratorio per valutare le prestazioni dei ricevitori commerciali, e il miglioramento della qualità di ricezione consentito dall'impiego del sistema di demodulazione CD3, brevettato dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica RAI (vedi paragrafo 5.5)

5.1 Ricezione con antenna direttiva

Le misure dell'intensità di campo e. m. sul canale 28 sono state condotte in 13 località, tre delle quali in area urbana e 10 in area extraurbana o rurale, regolando l'altezza e la direzione dell'antenna per massimizzare il livello del segnale r.f. ricevuto.
A causa di interferenze co-canale da parte di un segnale analogico, l'area di servizio DTT è risultata sensibilmente inferiore alle previsioni. Questo problema dovrebbe essere risolto dalla prossima allocazione del canale 66 al test-bed di Torino. Le previsioni sull'intensità di campo e.m., ottenute dai programmi di simulazione al computer, hanno mostrato un buon accordo con i risultati delle misure, con una deviazione di picco di circa 7 dB. L'intensità di campo e.m. alla soglia video (QEF) è risultata vicina ai valori proposti dalla CEPT per la pianificazione del servizio DTT.

Più accurate previsioni sul campo e.m. potranno essere ottenute impiegando un più sofisticato sistema di simulazione, in via di sviluppo presso il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica RAI, che tiene conto degli effetti della vegetazione e degli ostacoli degli edifici utilizzando il data-base del territorio.

5.2 Ricezione portatile "Indoor"

La possibilità di ricevere il segnale DTT all'interno degli edifici, con ricevitori portatili equipaggiati di antenna omnidirezionale offre interessanti prospettive commerciali di sviluppo del nuovo servizio.
Le prestazioni del sistema con ricezione portatile sono state analizzate all'interno del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica RAI (figura 4), un edificio di tre piani con una superficie totale di 800 m^2 per piano, caratterizzato da ampie finestre, in parte rivolte nella direzione del trasmettitore. Con un'intensità di campo e.m. di circa 80 dBμV/m al livello del tetto dell'edificio, i risultati delle misure, ottenuti ottimizzando di volta in volta la posizione dell'antenna ricevente, hanno dimostrato un buon accordo con i modelli proposti dalla CEPT, offrendo una ricezione "indoor" in circa l'85% dello stabile. In media all'interno dell'edificio si è misurata una perdita del livello del segnale ("penetration loss") da 6 a 7 dB, a seconda del piano. Si è notata inoltre una sensibile influenza sulla stabilità della ricezione dovuta alla presenza di persone che si muovono attorno al ricevitore.
Per aumentare la disponibilità del servizio all'interno dell'edificio si è installato al 2° piano un "gap-filler" a bassa potenza (2mW), operante in isofrequenza sul can. 28 ed alimentato attraverso un cavo coassiale dall'antenna direttiva installata sul tetto. Ciò ha consentito di ottenere una ricezione affidabile e stabile in tutto l'edificio.
L'effetto dell'inquinamento elettromagnetico prodotto dai "gap-filler", è stato analizzato teoricamente ipotizzando la ritrasmissione nell'edificio di 20 canali DTT ricevuti via etere (Bibl. 3). Le valutazioni sono state effettuate con riferimento al limite per l'esposizione ai campi elettromagnetici stabilito dall'ICNIRP e dalle norme italiane, e cioè un campo elettrico di 6 V/m con una

Fig. 4 - Ricezione portatile DTT nell'edificio del Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica RAI.

densità di potenza di 10 µW/cm2 per insediamenti residenziali. I primi risultati sembrano indicare che una distanza di guardia dai "gap-filler" di circa un metro sia sufficiente per garantire l'immunità dell'organismo umano alla esposizione al campo e.m. irradiato dalla schiera di gap-filler.

5.3 Ricezione mobile

Le prime sperimentazioni di ricezione mobile DTT sono state effettuate sul test bed di Torino ad una velocità media compresa tra 50 e 100 Km/ora, in area urbana e suburbana, impiegando i seguenti parametri di trasmissione:

- canale 28 (UHF);
- modulazione 16 QAM; FEC-1/2; Δ 1/32;
- 2K portanti OFDM;
- bit-rate utile: 12 Mbit/s.

È stato utilizzato un ricevitore commerciale (STB) collegato a un televisore, ed un misuratore del livello del segnale a radiofrequenza all'entrata del ricevitore medesimo. La qualità del servizio è stata valutata con riferimento ai seguenti parametri:

- livello del segnale r.f. alla soglia di ricezione ;
- copertura del servizio riferita alla lunghezza del percorso di prova;
- degradamento per effetto Doppler in funzione della velocità sui percorsi extra urbani;
- margine addizionale di campo e.m. richiesto nella pianificazione del servizio.

La figura 5 mostra una tipica registrazione del livello del segnale r.f. (dBm) in funzione della distanza coperta (Km) e della velocità dell'automezzo (Km/h) lungo un tipico percorso di prova in area urbana. La velocità massima si è mantenuta intorno a 50 Km/h, con frequenti fermate dovute alle condizioni del traffico (semafori, code, ecc.).

In condizioni di visibilità del trasmettito-

Fig. 5 - Sperimentazione DTT a Torino. Ricezione mobile in area urbana e suburbana.

re non si sono verificati problemi di ricezione. Si sono invece riscontrate occasionali interruzioni del servizio in corrispondenza a livelli del segnale r.f. inferiori a -75 dBm (soglia di Rayleigh per ricezione QEF), essenzialmente attribuibili all'effetto ombra degli edifici rispetto al trasmettitore.

Sulla base dei risultati di queste prove preliminari si è stimato un margine addizionale sul livello del campo e.m. di circa 10 dB per una soddisfacente copertura del servizio, rispetto ai valori stabiliti dalla CEPT per la ricezione fissa.

5.4 Ricezione negli impianti collettivi

In Italia la ricezione televisiva attraverso gli impianti centralizzati d'antenna (MATV) è largamente diffusa specie nelle grandi città, e gioca un ruolo determinante per lo sviluppo della TV digitale terrestre. Attualmente si stima che più di 10 milioni di abitazioni siano connesse a queste installazioni, in gran parte di vecchia costruzione, per la ricezione dei servizi televisivi analogici terrestri.

La TV digitale da satellite, che richiede all'antenna ricevente la "visibilità" diretta del satellite, talvolta limitata dagli edifici circostanti e dalla posizione dell'appartamento all'interno dell'edificio medesimo, spesso impone di ricorrere alla ricezione comunitaria adottando le soluzioni tecniche previste dal DVB, ossia la distribuzione dei segnali QPSK da satellite alla 1° frequenza intermedia (0,95÷2,15 GHz) oppure nella banda S (230÷470 MHz) con transmodulazione dei segnali da QPSK a 64QAM e con passo di canalizzazione di 8 MHz. In entrambi i casi l'adeguamento degli attuali impianti riceventi alla tecnologia digitale impone costi spesso significativi per l'utente (Bibl. 4).

A fronte di queste difficoltà, che frenano tuttora lo sviluppo della TV digitale da satellite, la distribuzione dei segnali televisivi digitali terrestri DVB-T negli attuali impianti centralizzati è generalmente pos-

sibile senza ricorrere a specifici e costosi interventi di adeguamento sul sistema di antenne e sulla rete di distribuzione.

L'effetto degli echi multipli, dovuti al disadattamento di impedenza della rete di distribuzione in cavo e le variazioni della risposta ampiezza frequenza nel canale vengono facilmente recuperati dalle prestazioni intriseche della modulazione multiportante OFDM. Particolare attenzione deve essere rivolta ai degradamenti dovuti al comportamento non lineare degli amplificatori r.f., a larga banda e/o a singolo canale, installati nel centralino. Sulla base di risultati sperimentali, per limitare tale degradamento a valori accettabili è necessario ridurre il livello dei segnali digitali distribuiti nella rete di 10÷15 dB al di sotto di quello dei segnali analogici, come è mostrato in figura 6 che rappresenta la schiera dei segnali presenti ad una generica presa di utente di una rete di distribuzione sperimentale realizzata in laboratorio.

La figura 7 mostra una possibile canalizzazione per la distribuzione negli impianti centralizzati di segnali analogici e digitali, terrestri e satellitari.

Fig. 6 - Ricezione di segnali terrestri analogici e digitali in un tipico impianto centralizzato d'antenna.

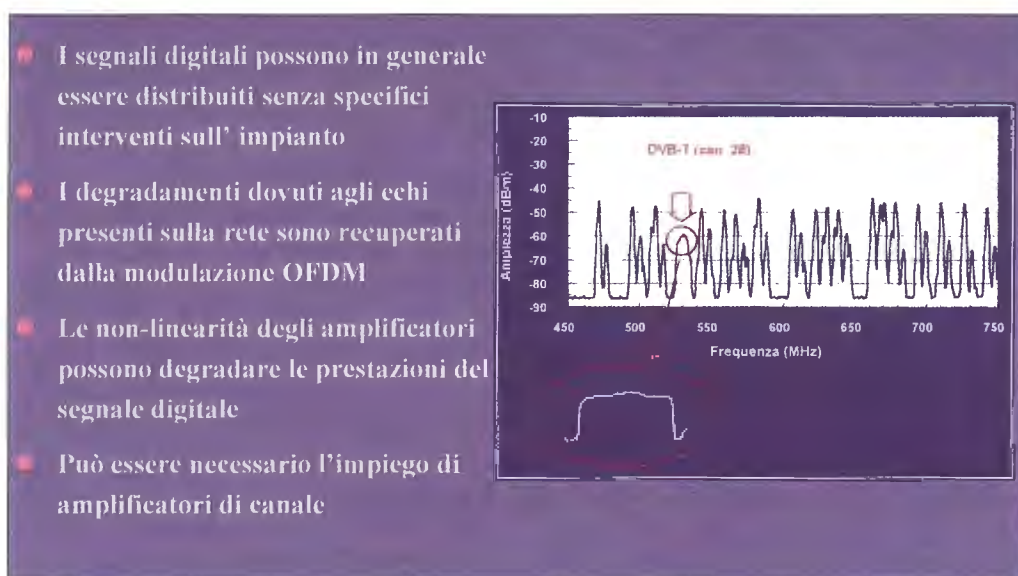
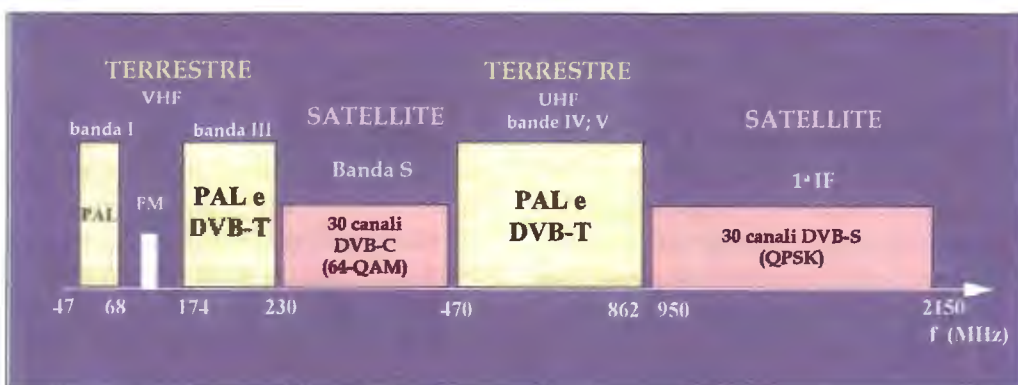



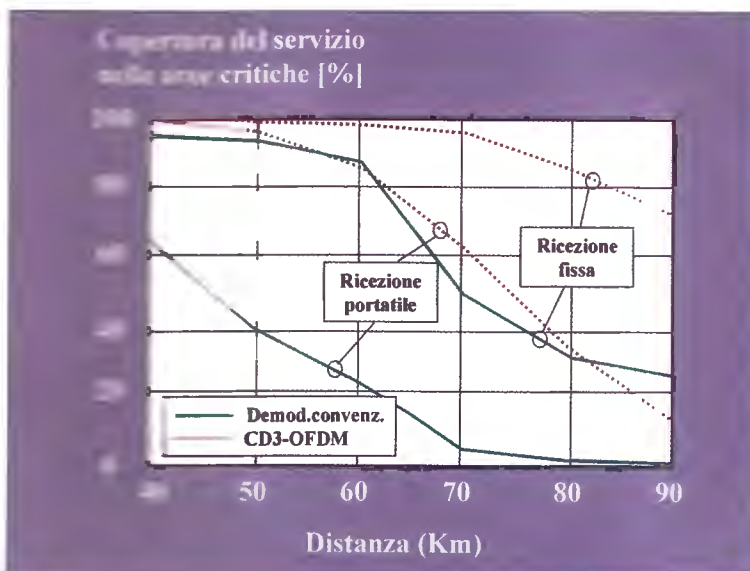
Fig. 7 - Possibile canalizzazione per la distribuzione di segnali analogici e digitali negli impianti centralizzati d'antenna.

5.5 Miglioramento delle prestazioni del ricevitore

Nel corso della definizione delle specifiche tecniche DVB-T la RAI ha ideato e proposto un sistema avanzato di demodulazione per i segnali OFDM denominato CD3 (Bibl. 5).

Questa sofisticata tecnica di demodulazione consente di migliorare significativamente le prestazioni del servizio in presenza di echi che cadono al di fuori dell'intervallo di guardia (Tg), presentando un degradamento graduale delle prestazioni. Grazie alla robustezza contro gli echi "lunghi", tipici delle reti SFN, è così possibile aumentare le distanze fra i trasmettitori, ad esempio da 50 a 75 Km, estendendo l'area di copertura. La figura 8 mostra, a titolo di esempio, il miglioramento delle prestazioni ottenute con il CD3 nei confronti di un demodulatore convenzionale nel caso di un sistema 64 QAM (FEC 2/3), su una rete SFN a struttura regolare.

Un prototipo hardware del ricevitore CD3 è stato realizzato e sperimentato in laboratorio, utilizzando un simulatore di canale caratterizzato da echi multipli, tipico cioè della configurazione riscontrabile sulle reti SFN. I risultati delle prove sperimentali confermano le eccellenti prestazioni del sistema stimate attraverso simulazioni al calcolatore. Nel caso tipico di echi multipli fuori dall'intervallo di guardia, con ritardi compresi tra 1,2 Tg (270 μs) e 1,5 Tg (340 μs), il CD3 consente di ottenere un guadagno dell'ordine di 4-10 dB, rispetto alla demodulazione tradizionale, in termini di rapporto di protezione co-canale (C/I).

La soluzione CD3, qualora fosse impiegata nei ricevitori commerciali, offrirebbe quindi vantaggi considerevoli per l'introduzione della DTT nello scenario italiano dove l'impiego di grandi reti SFN può rendersi necessario per ottimizzare l'utilizzazione delle limitate risorse di frequenza nelle bande VHF e UHF e rendere disponibili un numero consistente di nuovi servizi.

Fig. 8 - Miglioramento della copertura del servizio su rete SFN ottenuto impiegando l'algoritmo CD3 nel ricevitore.

6. Conclusioni

L'introduzione della televisione digitale terrestre (DTT), già consolidata in Gran Bretagna ed ormai imminente in Spagna ed in altri Paesi europei, rappresenta un passo decisivo nel processo di conversione globale alla soluzione digitale nel mondo della radiodiffusione.

L'avvio della DTT nel nostro Paese, dove lo spettro delle frequenze è densamente utilizzato, richiede tuttavia, da parte dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni e dal Ministero delle Comunicazioni, la creazione di condizioni favorevoli nel quadro istituzionale di regolamentazione. La nuova Legge 249/97 e il Piano delle Frequenze ad essa connesso, che identifica quattro canali nelle bande VHF/UHF per i servizi DTT, forniscono gli elementi di riferimento nella fase di lancio dei nuovi servizi attualmente all'esame dei Gruppi di studio del Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali.

Il possibile progressivo passaggio sul satellite degli attuali servizi analogici terrestri di Pay-TV e di alcuni servizi commerciali, renderà progressivamente disponibili nuove risorse in frequenza da destinare ai ser-

vizi DTT con l'obiettivo di completare il processo di conversione al digitale terrestre nel 2006.

In questo contesto, il Decreto Legge 15/1999 stabilisce l'obbligo di introdurre sul mercato italiano dal 1° Luglio 2000 soltanto decodificatori digitali in grado di ricevere qualsiasi servizio, sia "free-to-air" che a pagamento.

I primi risultati ottenuti nelle sperimentazioni DTT condotte dalla RAI sul test-bed di Torino hanno dimostrato l'affidabilità ed i vantaggi della soluzione digitale in termini di qualità tecnica del servizio e di potenzialità della nuova offerta. Tuttavia una condizione essenziale per il successo della DTT già nella fase di lancio è la disponibilità di ricevitori commerciali economici, basati sulla piattaforma multimediale aperta (MHP) in fase avanzata di standardizzazione da parte del DVB. Ciò consentirà di evitare il consolidarsi di soluzioni proprietarie, tutelando gli interessi dell'utenza e dei fornitori dei servizi e favorendo lo sviluppo del mercato.

7. Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare i colleghi A. Bertella, G. Carere, G. Cristadoro, P.B. Forni, S. Ripamonti, B. Sacco e V. Sardella per il contributo dato alla preparazione del presente articolo.

Bibliografia

1. - *CEPT: The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Broadcasting (DVB-T)*, "Chester", July '97

2. - M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: *Current Plans for "DTT" Implementation in a densely utilised frequency spectrum*, "International Montreux Symposium", June '99

3. - B. Sacco: *Gap fillers for Indoor TV reception compliance with human exposure standards*, "RAI Research Centre, Annex to Technical Report 99/21

4. - M. Cominetti, P.B. Forni, V. Sardella: *Digital broadcasting technologies and services: new opportunities for public operators*, "IBC '98", Amsterdam, September. '98

5. - V. Mignone, A. Morello, M. Visintin: *Advanced algorithm for improving DVB-T coverage in SFN*, "IBC '97"Amsterdam, September '97

Glossario

API	Application Programming Interface
BER	Bit Error Ratio
CEPT	European Radiocommunications Committee
CD3	Coded Decision Directed Demodulation
C/I	Rapporto potenza Portante/potenza Interferente
C/N	Rapporto potenza Portante/potenza Rumore
DAB	Digital Audio Broadcasting
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-S	Digital Video Broadcasting- Satellite
DVB-T	Digital Video Broadcasting- Terrestrial
EACEM	European Association of Consumer Electronics Manufacturers
EPG	Electronic Programme Guide
ERP	Effective Radiated Power
FEC	Forward Error Correction
GPS	Global Positioning System
ICNIRP	International Commission on Non Ionizing Radiation Protection
IDTV	Integrated Digital TV
MATV	Master Antenna TV
MFN	Multi Frquency Network
MHP	Multimedia Home Platform
MPEG	Motion Picture Expert Group
NM	Noise Margin
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QEF	Quasi Error Free
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SFN	Single Frequency Network
SMATV	Satellite Master Antenna TV
STB	Set-Top-Box
TS	Transport Stream
UHF	Ultra High Frequencies
VHF	Very High Frequencies

La televisione digitale terrestre: un'opportunità per il nostro Paese

dr. Mario Cominetti
Consulente Rai e già Vice Direttore del Centro Ricerche Rai

Sommario

Lo scenario televisivo europeo sta evolvendo rapidamente con l'introduzione della tecnologia digitale sui vari media – satellite, terrestre, cavo, reti a larga banda – adottando gli standard sviluppati dal DVB (Digital Video Broadcasting). In questo contesto la televisione digitale terrestre (DTT) si candida a diventare, nel medio e lungo termine, la forza trainante di un mercato di massa che potrà integrare ed estendere l'offerta dei canali satellitari e via cavo, soddisfacendo globalmente le diverse tipologie dei servizi – nazionali, regionali e locali – e consentendo anche la ricezione con terminali portatili e mobili.

Il Libro Bianco dell'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, la Legge n.66/2001 ed il Regolamento ad essa associato, definiscono il quadro normativo nazionale e identificano i "soggetti" del nuovo mercato (fornitore di contenuti, operatore di rete, fornitore di servizi), ponendo le premesse per il lancio della DTT nel nostro Paese attraverso una fase iniziale di sperimentazione.

Un ruolo centrale è assunto dalla disponibilità di ricevitori DTT economici e dotati di una piattaforma "aperta" alla evoluzione tecnologica e dei nuovi servizi: condizione essenziale per favorire lo sviluppo di un mercato orizzontale nell'interesse dell'utenza e degli operatori. La piattaforma DVB-MHP, multimediale e interattiva, soddisfa pienamente tali requisiti e risponde alle indicazioni della recente Direttiva del Parlamento europeo che interessa il nuovo quadro normativo dello scenario delle telecomunicazioni, della radiodiffusione e delle tecnologie dell'informazione.

La RAI, che già ha contribuito attivamente al Progetto DTT, in ambito al Comitato Nazionale per lo Sviluppo dei Sistemi Digitali costituito dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni, in ottemperanza alle disposizioni ed alle procedure definite nella normativa, si prepara ad estendere la sperimentazione sulla DTT ai vari aspetti: tecnologici, editoriali e di produzione dei contenuti, in modalità DVB-MHP, allo scopo di individuare i modelli di business per i nuovi servizi.

1. Introduzione

La rivoluzione digitale è il fattore dominante di uno scenario caratterizzato dalla convergenza fra i settori della radiodiffusione, delle telecomunicazioni e delle nuove tecnologie dell'informazione. Nel campo della radiodiffusione televisiva le specifiche tecniche dei nuovi sistemi sono sviluppate dal Consorzio europeo DVB (Digital Video Broadcasting), che raccoglie oggi più di 300 partner di oltre 30 Paesi, e sono adottate nell'intero contesto internazionale (figura 1). Tali specifiche, che una volta approvate dall'ETSI diventano standard europei, coprono globalmente tutti gli anelli della catena di diffusione digitale televisiva – mostrata in figura 2 – dalla generazione dei programmi alla distribuzione all'utente. I sistemi della famiglia DVB adottano come nucleo comune la codifica video MPEG-2, nel profilo MP@ML, che estende le prestazioni dell'algoritmo di compressione DCT sviluppato da RAI e Telettra alla fine degli anni '80.

La RAI, attraverso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT), ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB, in particolare per quanto riguarda la televisione digitale da satellite (DVB-S) [1], sui canali di diffusio-

Fig. 1 - Diffusione degli standard televisivi digitali nel mondo

ne terrestri (DVB-T) [2], nelle reti in cavo condominiali (SMATV/MATV) [3] e nei sistemi di contributo via satellite (DVB-DSNG) [4].

Ma quali sono i fattori innovativi della tecnologia digitale? Sicuramente il miglioramento della qualità tecnica del prodotto televisivo – cioè l'immagine e il suono – con possibilità di evolvere verso l'alta definizione; ma soprattutto il drastico aumento dell'offerta di programmi grazie all'efficacia dell'algoritmo di compressione MPEG-2 che consente di raggruppare più programmi televisivi su un "blocco" (o multiplex) che viene poi irradiato sul canale di diffusione convenzionale: tipicamente da 4 a 8 programmi a seconda della capacità trasmissiva disponibile (20÷24 Mbit/s sui canali terrestri; 34÷38 Mbit/s sui canali satellitari). La possibilità di ricevere con apparati portatili e servire anche l'utenza mobile (negli autobus, nei treni, ecc.), su base nazionale, regionale e locale, sono altri fattori premianti. Queste significative innovazioni tecnologiche aprono nuovi scenari di mercato, dove l'utente potrà accedere ad una vasta e diversificata offerta di servizi televisivi, generalisti e tematici, in chiaro e pay, multimediali e interattivi. Ne consegue un cambio radicale di cultura che interessa globalmente l'intera catena del valore ed introduce nuove modalità di produzione e fruizione dell'informazione televisiva.

Fig. 2 - Tipica catena di diffusione digitale multi-programma DVB

L'interattività sarà molto probabilmente la chiave del successo del futuro servizio televisivo, specie nei mercati caratterizzati da una ricca offerta competitiva tra operatori e piattaforme distributive.

Un ruolo importante sarà assunto dal quadro di regolamentazione all'interno del quale le imprese si troveranno ad operare. Sul piano normativo nazionale, importanti passi sono stati effettuati nell'ultimo quinquennio a partire dalla emanazione della Legge n.249/1997 che ha istituito l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni ed ha affrontato per la prima volta le problematiche relative alla conversione del sistema radiotelevisivo terrestre dalla tecnologia analogica a quella digitale. La Legge n. 66/2001, del 20 marzo 2001, ed il Regolamento per la introduzione della DTT approvato dalla Autorità il 21/11/2001, danno certezza al quadro normativo e pongono le premesse per l'avvio dei nuovi servizi attraverso una fase iniziale di sperimentazione.

Nell'articolo, viene effettuata una analisi del percorso evolutivo della televisione digitale nel contesto europeo, dalla introduzione dei primi servizi via satellite fino ai giorni nostri, dove si assiste – sul piano

istituzionale e tecnologico – ad una intensa attività mirata a promuovere soluzioni "aperte" per la fruizione dei nuovi servizi dell'era digitale.

Si illustrano quindi gli elementi principali della normativa italiana sulla DTT e le tappe di riferimento del processo di conversione dal mondo analogico a quello digitale, con particolare attenzione alle prospettive offerte dalla nuova tecnologia agli operatori del settore ed agli utenti.

2. Lo scenario del broadcasting digitale

L'introduzione della televisione digitale negli standard DVB, iniziata in Europa nel 1994 con la diffusione diretta da satellite (DTH), sta cambiando profondamente gli scenari della comunicazione e del mercato [5]. Si stima oggi che oltre 22 milioni di utenti, pari a circa il 72% dell'intero mercato della televisione digitale, acceda ai nuovi servizi distribuiti dai canali satellitari di Eutelsat e Astra, attraverso sistemi di ricezione individuali, installazioni comunitarie condominiali e grandi reti in cavo.

Questi nuovi servizi sono stati introdotti prevalentemente dagli operatori pay secondo una strategia di "mercato verticale" che assicura all'operatore il controllo dell'intera catena del valore, dalla codifica in MPEG-2 dei contenuti audio/video alla messa in onda del "bouquet di programmi" sui canali distributivi, ed allo stesso ricevitore d'utente. Si sono così sviluppati, sin dalla fase iniziale, sistemi di accesso condizionato (CA) "proprietari" che il DVB, nello sviluppo della normativa per il satellite e il cavo, non aveva previsto.

Il Simulcrypt e il Multicrypt sono le ben note soluzioni tecniche proposte a tutela dei diritti dell'utenza nell'accesso a tali servizi. Nel Simulcrypt gli operatori si accordano per trasmettere nel proprio bouquet anche le chiavi di accesso dell'altro sistema CA, consentendo così l'uso di un unico ricevitore – dell'una o dell'altra piattaforma – per accedere all'offerta dei due operatori; è questo il caso delle trasmissioni via satellite dei servizi in abbonamento di Telepiù/D+ e Stream, effettuate in ottemperanza alle disposizioni della Legge n.78/1999 per il "decoder unico" . Nel Multicrypt l'accesso ai diversi servizi pay è consentito dall'impiego nel ricevitore dell'"interfaccia comune" standardizzata dal CENELEC (EN 50221): una soluzione avanzata che consiste nel portare il sistema di accesso condizionato proprietario su un modulo CA esterno al ricevitore ed inserito in esso attraverso un connettore PCMCIA.

Oltre all'accesso condizionato, altri due elementi caratteristici delle piattaforme digitali hanno influito sull'utilizzazione aperta della normativa DVB, nei servizi e nei terminali riceventi, di fatto frenando lo sviluppo del mercato: l'Electronic Programme Guide (EPG), la guida elettronica che indirizza l'utente alla scelta del programma all'interno del palinsesto, e l'Application Programming Interface (API), il middleware del ricevitore che interagisce con il sistema operativo per interpretare e visualizzare le applicazioni. Questi elementi, essenziali per introdurre servizi interattivi/multimediali ed oggetto di soluzioni proprietarie (MediaHighway, OpenTV, ecc.), si sono in pratica tradotti in strumenti destinati a stabilire barriere tecnologiche alla libera scelta dei servizi pay a cui abbonarsi, favorendo l'instaurarsi di posizioni dominanti, oltre ad ostacolare lo sviluppo del mercato "consumer" dei ricevitori a causa del disorientamento generato nell'utenza.

Sotto la spinta del nuovo mercato, caratterizzato dall'offerta di prodotti e servizi multimediali e interattivi, la scelta di una soluzione comune e "aperta" alla evoluzione tecnologica, appare quindi come condizione essenziale per il successo del broadcasting digitale nel contesto europeo.

Lo standard DVB-MHP (Multimedia Home Platform) è stato sviluppato per soddisfare tali requisiti [6]. Si tratta di una piattaforma aperta all'utilizzo da parte di ogni soggetto a condizioni eque di fruizione dei diritti di proprietà intellettuale, indipendente dal sistema di accesso condizionato ed in grado di garantire l'interoperabilità tra prodotti, servizi e termi-

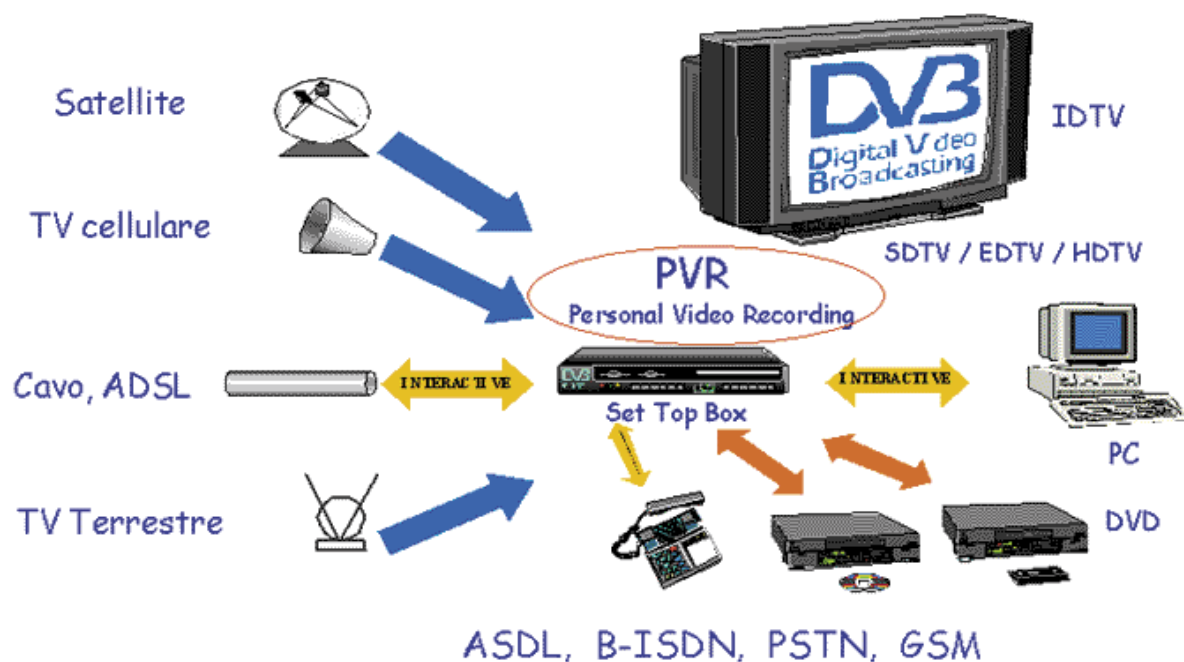



Fig. 3 - Piattaforma multimediale domestica DVB-MHP

nali. MHP è una piattaforma evoluta che tutela gli investimenti dei fornitori di contenuti e servizi, dei produttori di ricevitori e della stessa utenza, ed offre concrete prospettive di sviluppo di un mercato “orizzontale” sui vari media: satellite, terrestre, cavo, reti a larga banda.

La normativa MHP lascia piena libertà alle specifiche implementazioni del terminale d’utente – SetTopBox, TV digitale integrato, PC multimediale – da un profilo medio-basso a quello più elevato; ciò allo scopo di concedere a tutti gli operatori la massima libertà possibile nel perseguire i propri modelli commerciali.

Sebbene l’ultima e definitiva parola sul destino del MHP dovrà essere pronunziata dal mercato, l’attività svolta dal DVB nella definizione dello standard ha stimolato in misura significativa l’innovazione tecnologica in diversi settori industriali, consolidando il principio che l’espansione e l’integrazione dei mercati sia possibile attraverso l’armonizzazione delle tecnologie utilizzate, e della sostituzione progressiva di quanto è proprietario con standard aperti e accessibili secondo una politica di equità.

2.1 La Piattaforma Multimediale Domestica

Lo sviluppo della tecnologia digitale va trasformando il ricevitore domestico tradizionale – il televisore – in un terminale intelligente con capacità di elaborazione e memorizzazione sempre più vicine a quelle di un computer multimediale, in grado di effettuare vere e proprie transazioni commerciali (acquisto/vendita di beni materiali e/o finanziari) collegate ai classici annunci pubblicitari.

Il ricevitore sembra così destinato a collocarsi al centro di una piattaforma multimediale domestica DVB-MHP in un ambiente di “home-entertainment” dove i vari dispositivi periferici sono interconnessi in rete locale (figura 3).

La parte vitale dello standard DVB-MHP è l’interfaccia API; essa si basa sul linguag-

gio "Java™", il linguaggio di programmazione universale che, attraverso la Java Virtual Machine, assicura l'indipendenza dall'hardware ed impone requisiti minimi di memoria nel ricevitore. Ciò consente l'interoperabilità e la scalabilità, ossia la possibilità di realizzare funzioni e applicazioni compatibili con le prestazioni delle diverse soluzioni tecnologiche.

Un accordo con Sun Microsystems, detentore dei brevetti Java™, consente al DVB di mantenere il controllo della specifica, garantendo la compatibilità verso il basso con l'eventuale evoluzione di Java™.

Lo standard MHP definisce tre principali tipologie:

- Il profilo Enhanced Broadcasting che arricchisce il servizio televisivo tradizionale con contenuti multimediali, scaricati via etere nella memoria del ricevitore, eventualmente sincronizzati con il programma in onda, e con possibilità per l'utente di interagire localmente (interattività locale);
- Il profilo Televisione Interattiva che aggiunge al precedente la possibilità per l'utente di accedere a servizi on-demand tramite un canale di ritorno (interattività on-line);
- Il profilo Accesso a Internet che consente di ricevere contenuti Web attraverso il canale diffusivo e/o le reti PSTN/ISDN e memorizzarli nel terminale d'utente; è prevista l'interazione fra servizi Internet e Broadcasting.

I tre profili suddetti consentono di soddisfare globalmente le richieste del mercato in un'ottica di evoluzione compatibile, arricchendo i servizi televisivi di base con una grande varietà di applicazioni: IP multicasting, streaming audio-video di news, film, eventi sportivi, Teletext avanzato, EPG evoluta, giochi, pubblicità interattiva, t-commerce, home-banking, servizi on-demand, ecc. Particolarmente interessanti nella fase di lancio dei servizi DTT sono i profili Enhanced Broadcasting e Televisione Interattiva.

La flessibilità della specifica MHP consente quindi lo sviluppo di terminali d'utente con potenzialità crescenti: dallo "zapper" di base al terminale interattivo. La disponibilità dell'hard-disk, nei ricevitori più evoluti, permetterà di aumentare le funzionalità nell'accesso ai nuovi servizi consentendo all'utente la fruizione personalizzata dei programmi (PVR, Personal Video Recording) attraverso la creazione in locale di un vero e proprio palinsesto. I principali costruttori stanno già immettendo sul mercato ricevitori di nuova generazione, equipaggiati di hard-disk con capacità variabile da 20 GB a 60-80GB, orientati ad un mercato medio-alto; alcuni dispongono inoltre di un "doppio sintonizzatore", che consente all'utente di memorizzare (fuori linea) un determinato programma contemporaneamente alla normale fruizione del programma televisivo selezionato. Queste funzioni avanzate, tipiche dei PC multimediali, sembrano destinate a sostituire in prospettiva il registratore televisivo domestico.

La prossima versione dello standard MHP permetterà di sfruttare appieno la funzionalità PVR. Nasce, in questo contesto, l'esigenza di salvaguardare i "copyright" sui contenuti, tutelando i produttori contro la duplicazione non autorizzata del materiale che, grazie alla codifica digitale, risulta disponibile all'utente con la stessa qualità di sorgente. Questo problema, già emerso nel caso del DVD, è attualmente allo studio del DVB.

L'impiego su scala europea della piattaforma aperta MHP, permetterà una potenziale riduzione dei costi di produzione dei programmi di TV digitale interattiva grazie

alla possibilità di riutilizzare gli stessi contenuti in un mercato globale; ne deriva un aumento del valore del prodotto che porterà benefici agli operatori del settore.

L'offerta di questi nuovi servizi richiede lo sviluppo di applicazioni software basate su tecnologia Java™, la cui padronanza è oggi esclusivamente in possesso di personale altamente specializzato. Un problema che si pone agli operatori dei nuovi servizi, nella fase iniziale, è di investire in risorse umane con questo tipo di professionalità, di taglio prettamente informatico, al fine di disporre di una piattaforma di produzione dei contenuti autonoma in tecnologia Java™ oppure, non intendendo allocare investimenti ingenti in mancanza di una chiara percezione dei possibili ritorni, affidarsi a soluzioni in out-sourcing che però comportano il rischio di perdere il controllo del servizio appaltato in realizzazione e gestione a terzi. Tuttavia, va sottolineato che cominciano ad essere disponibili sul mercato dei "tools di authoring" che consentono di produrre applicazioni MHP anche senza una specifica conoscenza del linguaggio Java™. In ogni caso, dovranno essere adottate le necessarie procedure di validazione dell'applicazione prodotta (autenticazione) secondo la normativa MHP prima di immetterla sul canale di distribuzione.

Fig. 4 - Migrazione verso la piattaforma multimediale DVB-MHP

2.2 Migrazione verso la piattaforma MHP

Le prospettive di successo del processo di migrazione verso la piattaforma DVB-MHP sono condizionate da vari fattori: tecnici, commerciali e all'esistenza o meno sul mercato di servizi operativi che impiegano soluzioni API proprietarie. I principali produttori di tali sistemi – "Canal Plus", "Open TV" e "Liberate" – sostengono pubblicamente di appoggiare la soluzione DVB-MHP (figura 4). Tuttavia, come queste dichiarazioni si traducano in pratica in una politica commerciale merita una più attenta valutazione.

Nel caso di "Canal Plus" e "Open TV", i nuovi ricevitori sarebbero in grado di ricevere e interpretare sia le applicazioni MHP che quelle proprietarie attraverso l'impiego di un "interprete MHP" più complesso che opera all'interno degli ambienti proprietari MediaHighway (di Canal Plus) o Open TV.

"Liberate", partendo dalla propria soluzione proprietaria, incentrata sull' HTML, intenderebbe entrare nel mondo MHP attraverso il profilo Accesso a Internet che è basato sull' HTML.

Non è chiaro comunque se le soluzioni sopra indicate porteranno allo sviluppo di ricevitori pienamente compatibili con la normativa MHP e fra loro interoperabili, consentendo l'effettivo sviluppo di un mercato orizzontale.

Un caso particolare è rappresentato da MHEG-5, lo standard "pubblico" impiegato in Gran Bretagna nei servizi di televisione digitale terrestre lanciati nel novembre 1998, prima cioè che il DVB definisse le specifiche MHP. A quell'epoca, l'introduzione di applicazioni avanzate – interattive e multimediali – non era ritenuta prioritaria sul piano commerciale dai vari operatori

e la soluzione MHEG-5 era considerata adeguata alle richieste del mercato. Anche se nettamente inferiore all'MHP, in termini di prestazioni, MHEG-5 presenta alcuni punti in comune, come il formato dei dati per il "carousel DSM-CC" – impiegato nella distribuzione ciclica di prodotti multimediali attraverso il canale diffusivo – che potrebbe facilitare la transizione da un sistema all'altro.

I Paesi Nordici, raggruppati nel Consorzio NorDig DTT [7], che raccoglie ben 24 Enti, hanno definito una strategia per lo sviluppo della TV interattiva sulle reti di diffusione terrestri basata sull'impiego dell'MHP già nella fase di lancio dei nuovi servizi (è questo il caso della Finlandia); essa prevede inoltre la progressiva migrazione all'MHP dei servizi esistenti (è questo il caso della Svezia).

Altri operatori hanno già annunciato piani di utilizzazione dell'MHP nel contesto internazionale: un importante consorzio tedesco (ARD, ZDF, RTL, DLM, Kirch-Gruppe), Cable Labs (USA), Australia (FACTS), Corea (SkyLife), Cina (Shenzen Cable TV).

Le posizioni dei vari operatori e dei vari Paesi lasciano intravedere uno scenario evolutivo del broadcasting digitale verso il mondo dell'interattività e della multimedialità difficilmente prevedibile; tuttavia, a seconda delle situazioni nazionali, si possono individuare due principali linee di indirizzo.

Dove già esistono servizi operativi che impiegano sistemi proprietari con larga diffusione del parco ricevitori, il processo di migrazione potrebbe essere affrontato con l'immissione sul mercato dei ricevitori MHP e la trasmissione in "simulcast" delle applicazioni generate secondo le due piattaforme, consentendo in tal modo la fruizione del servizio anche agli utenti tradizionali. Si ricorda che il simulcast delle applicazioni ha alcune similitudini con il Simulcrypt dei messaggi di accesso condizionato (Seca e NDS) diffusi via satellite da Telepiù/D+ e Stream in conformità alle disposizioni vigenti in Italia per il "decoder unico" (Legge n. 78/1999).

Date le superiori capacità potenziali dell'MHP, il parco dei nuovi ricevitori dovrebbe aumentare progressivamente fino a diventare predominante, determinando una progressiva contrazione del mercato dei vecchi ricevitori. Questo scenario implica tuttavia uno spreco di banda per il fornitore del servizio, durante la fase di simulcast, ed un aumento dei costi di produzione dei contenuti e di gestione delle due piattaforme.

Una soluzione alternativa al simulcast, considerata in Gran Bretagna da BBC e ITV (già OnDigital) per i servizi DTT, prevede lo sviluppo di ricevitori MHP in grado di ricevere anche le applicazioni MHEG-5 attraverso una opportuna interfaccia (plug-in). Il plug-in è un componente software installato nel terminale ricevente allo scopo di rendere compatibili i prodotti di una tecnologia preesistente con la nuova piattaforma.

Considerando l'attuale limitata offerta di applicazioni interattive/multimediali in MHEG-5 questa linea evolutiva verso l'MHP sembra offrire concrete prospettive di sviluppo, salvo verificare l'impatto sul costo del ricevitore.

Dove ancora non esistono servizi operativi, o il parco di ricevitori dei sistemi proprietari in possesso dell'utenza è limitato, la soluzione naturale è quella di adottare la piattaforma DVB-MHP sin dalla fase di lancio dei nuovi servizi. I vantaggi sono evidenti: potendosi operare su una piattaforma unica è possibile contenere i costi di produzione dei contenuti e di gestione

del servizio, favorendo lo sviluppo di un mercato orizzontale attraverso la competizione fra i costruttori dei ricevitori. Questa scelta sembra la più conveniente per il lancio dei servizi di televisione digitale terrestre nel nostro Paese.

3. Il quadro istituzionale europeo

Il Parlamento Europeo sta elaborando una Direttiva che copre globalmente il nuovo quadro normativo dello scenario delle telecomunicazioni, della radiodiffusione, dei media e delle tecnologie dell'informazione, con particolare attenzione all'accesso alle reti e ai servizi di comunicazione elettronica ed al servizio universale. Fra le varie proposte, un tema importante riguarda l'impiego di una interfaccia aperta (ad es. la common Interface DVB) nei ricevitori digitali immessi sul mercato a partire dal gennaio 2002, che consenta la connessione di dispositivi periferici e l'accesso a servizi criptati attraverso l'utilizzazione di moduli CA esterni al ricevitore.

Un secondo obiettivo della Direttiva quadro è assicurare l'interoperabilità dei servizi e dei terminali nel mercato della televisione digitale interattiva a tutela dell'utenza e degli operatori del settore. A questo scopo si incoraggia l'utilizzo, nei nuovi servizi, di soluzioni API ed EPG aperte e si promuovono le iniziative volte a favorire il passaggio dalle attuali soluzioni proprietarie a quelle aperte, attraverso l'emanazione di "Memoranda of Understanding" sottoscritti dai vari operatori.

In questo contesto, lo standard DVB-MHP assume una grande valenza strategica in particolare nei Paesi, come l'Italia, che si apprestano ad introdurre la televisione digitale terrestre senza i vincoli di piattaforme proprietarie già esistenti.

L'utilizzazione di tale standard è fortemente sostenuta dall' MHP Action Group – costituito nel settembre 2001 su iniziativa di DigiTAG, EBU, EICTA (ex EACEM) – che raccoglie i principali attori dello scenario televisivo europeo della radiodiffusione e dell'elettronica di consumo. Il Memorandum of Understanding (MoU), prodotto dall'Action Group, evidenzia l'importanza strategica dell'interattività nel futuro scenario della televisione digitale e raccomanda l'impiego dello standard MHP nei nuovi servizi di televisione digitale interattiva per garantire l'interoperabilità dei prodotti e dei terminali e superare la frammentazione del mercato dovuta ai sistemi proprietari.

4. La televisione digitale terrestre in Europa

Nel quadro del futuro sistema radiotelevisivo la televisione digitale terrestre (DTT) è destinata a svolgere un ruolo centrale a motivo della sua facilità ed economicità di ricezione ed alla "universalità" del servizio stesso. Essa costituisce forse la più importante innovazione tecnologica nella storia della televisione, ancora più del colore e della diffusione via satellite, ed è destinata a rivoluzionare l'intero sistema televisivo italiano nonché l'attuale scenario della domanda e dell'offerta. Essa offrirà alla grande utenza ed agli operatori del settore significativi vantaggi e nuove opportunità:

- aumento sostanziale e diversificazione dell'offerta (4÷5 programmi per canale r.f.);
- interattività e multimedialità;
- elevata qualità di ricezione anche con terminali portatili e possibilità di servire l'utenza mobile;
- diverse tipologie di servizi: su base nazionale, regionale e locale;

- sfruttamento ottimale dello spettro di frequenza con possibilità di introdurre reti a singola frequenza (SFN) oltre alle reti convenzionali multi-frequenza (MFN);
- ricezione negli impianti condominiali in cavo con costi marginali per l'utente.

La figura 5 illustra le caratteristiche e le funzionalità peculiari della televisione digitale terrestre mentre le figure 6 e 7 mostrano, rispettivamente, le tipiche architetture delle reti SFN e MFN. Nelle reti SFN tutti i trasmettitori operano sulla stessa frequenza e contribuiscono a determinare l'area di copertura totale; questa modalità operativa è consentita dalle particolari prestazioni della modulazione digitale multi-portante COFDM – che sta alla base dello standard DVB-T – che consente di operare su un canale di diffusione terrestre affetto da propagazione multicammino imputabile agli echi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali della rete [2], [8]. Nelle reti MFN, che caratterizzano l'attuale servizio televisivo analogico, ciascun trasmettitore impiega una frequenza diversa (C1, C2,…Cn) e quindi opera in modo indipendente e con una sua propria copertura; è ovviamente possibile riutilizzare le stesse frequenze purchè gli impianti di diffusione siano sufficientemente lontani onde evitare possibili interferenze reciproche.

In un'ottica di medio-lungo termine, quando il processo di conversione dall'analogico al digitale si avvicinerà alla fase di regime e si renderanno disponibili in Italia adeguate risorse spettrali, sarà possibile prevedere anche l'introduzione di servizi DTT orientati all'utenza mobile che si affiancheranno ai servizi di telecomunicazione della terza generazione (GPRS e UMTS), allargando lo scenario delle comunicazioni mobili terrestri (figura 8).

Ricezione mobile

- Modulazione digitale multiportante OFDM
- Immunità al rumore, interferenze, riflessioni
- Bouquet di 4 - 5 programmi per canale r.f.
- Flessibilità del servizio (video, audio, dati)
- Ricezione fissa, portatile, mobile
- Elevata efficienza spettrale (reti SFN)
- Utilizzazione degli attuali impianti di ricezione condominiali

Fig. 5 - Scenario introduttivo della televisione digitale terrestre (DTT)

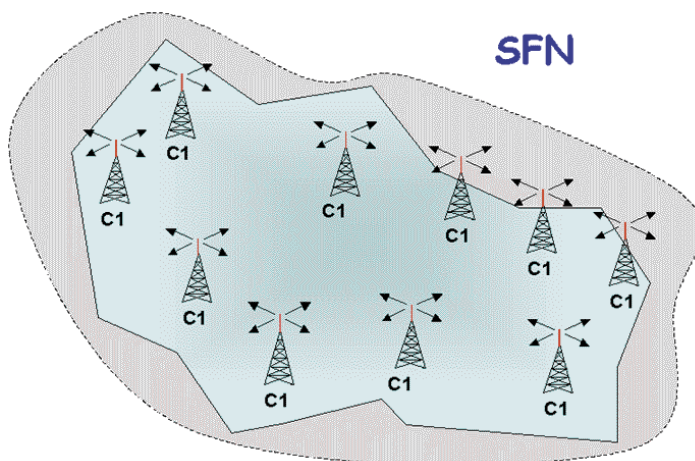



Fig. 6 - Configurazione e copertura di una rete televisiva digitale a singola frequenza (SFN)

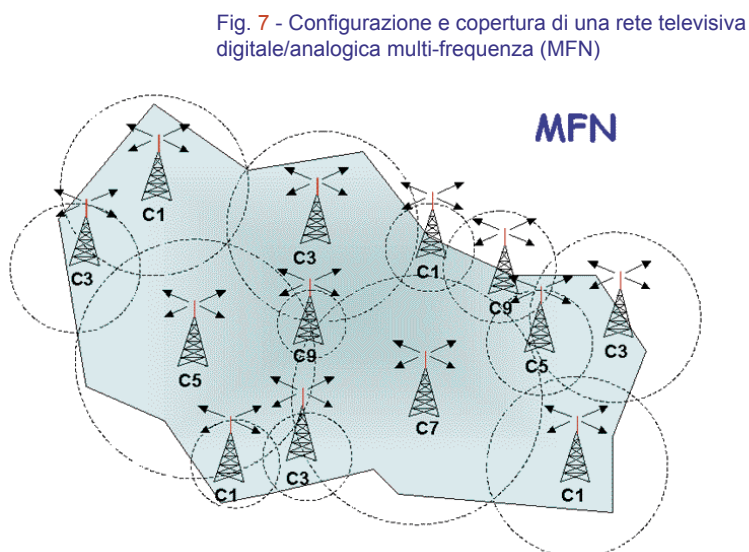



Fig. 7 - Configurazione e copertura di una rete televisiva digitale/analogica multi-frequenza (MFN)

Lanciata nel novembre 1998 in Gran Bretagna, la DTT è ormai parte integrante del nuovo assetto del mercato radiotelevisivo con servizi in chiaro e a pagamento offerti da BBC e ITV. Introdotta successivamente in Svezia e in Spagna, si candida a diventare nel medio e lungo termine la forza trainante di un mercato di massa di portata europea, in grado di estendere l'offerta dei servizi informativi di base con nuovi servizi interattivi e multimediali.

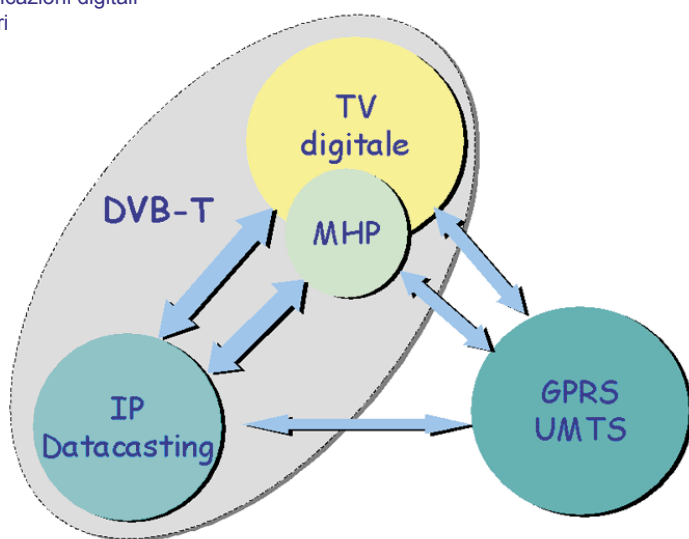
In Spagna il servizio lanciato da Quiero TV, che adotta la soluzione API proprietaria Open TV, sembra tuttavia incontrare difficoltà sul piano commerciale nella competizione con i servizi via satellite di CanalSateliteDigital e ViaDigital; la necessità di arricchire l'offerta con l'interattività e la multimedialità, nonché l'evoluzione del quadro europeo verso la piattaforma aperta DVB-MHP, hanno creato una situazione di incertezza che ha frenato lo sviluppo del mercato.

Una simile iniziativa lanciata in Svezia nell'aprile 1999, e che utilizza OpenTV, è attualmente congelata in vista di passare alla piattaforma MHP adottata dal Consorzio NorDig DTT al quale i vari operatori svedesi aderiscono.

In Finlandia il lancio della DTT su vasta scala è pianificato per la seconda metà del 2002 allorchè saranno disponibili sul mercato i ricevitori MHP promossi da NorDig DTT.

In gran parte degli altri Paesi europei, fra i quali l'Italia, la Francia, la Germania e l'Olanda, sono in corso varie sperimentazioni DTT di carattere tecnico, commerciale e pre-operativo. E' importante segnalare che in Germania è stato formulato un piano per l'introduzione a breve del primo servizio DTT rivolto anche all'utenza mobile nell'area di Berlino.

L'impatto della TV digitale terrestre nel contesto europeo è attualmente limitato alla Gran Bretagna, alla Spagna e alla Svezia, dove esistono veri e propri servizi operativi; in termini di incidenza sul mercato globale del broadcasting digitale tale impatto si colloca intorno al 6%, contro il 72% del satellite e il 22% del cavo. Si prevede però che già nel corso del 2002 il lancio dei primi servizi operativi in Finlandia possa dare un significativo impulso alla diffusione della DTT.

Fig. 8 - Scenario evolutivo delle comunicazioni digitali terrestri

5. Il contesto nazionale

In Italia la televisione digitale si è sviluppata via satellite con una ricca offerta di canali generalisti e tematici in gran parte a pagamento. Attualmente sono oltre 4 milioni le parabole installate, con un parco di ricevitori di oltre 2,5 milioni di unità. La conversione del sistema radiotelevisivo dall'analogico al digitale in atto nel contesto europeo è una tappa necessaria ed essenziale anche per il nostro Paese per l'avvio di un progetto globale che consenta di accrescere la competitività sui mercati

internazionali e garantisca positive ricadute sul comparto occupazionale interno. Su queste linee strategiche si è mossa l'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni che, secondo le indicazioni della Legge n. 249 del 31 luglio 1997, ha pubblicato nel settembre 2000 il "Libro Bianco" sulla televisione digitale terrestre [9] nel quale si individuano gli scenari per l'introduzione della DTT in Italia.

La "Legge n.66/2001", approvata il 20 marzo 2001, delinea il passaggio in tempi rapidi – nel quinquennio 2002-2006 – del sistema televisivo italiano dal regime analogico al regime digitale e richiede alla Autorità l'attuazione entro il 31/12/2002 del Piano Nazionale di assegnazione delle frequenze in tecnica digitale, che costituirà lo strumento essenziale per rendere disponibili le necessarie risorse in frequenza nella attuale situazione di occupazione caotica dello spettro nelle bande di radiodiffusione terrestre VHF/UHF.

Un ruolo cruciale assume il "Regolamento sulla DTT", approvato dall'Autorità il 21 novembre 2001, che definisce le norme di applicazione di quanto specificatamente previsto dalla Legge n.66/2001 per l'introduzione della nuova tecnologia attraverso una fase transitoria di sperimentazione.

La Legge n. 66/2001 e il Regolamento definiscono anche il quadro normativo per la radiofonia digitale (DAB) che però esula dall'analisi condotta nel presente articolo.

5.1 Il Libro Bianco

Il Libro Bianco sul digitale terrestre è il risultato dell'attività del Comitato per lo sviluppo dei sistemi digitali, istituito il 25 novembre 1998 dalla Autorità allo scopo di definire obiettivi, condizioni e modalità per lo sviluppo in Italia della tecnologia digitale e dei nuovi servizi. Il Comitato, attraverso quattro Gruppi di lavoro, ha esaminato le tematiche di rilievo: requisiti di servizio e standard di qualità (Gruppo A), architettura delle reti e numero dei programmi (Gruppo B), standard del decoder e problematiche industriali (Gruppo C), proposte operative per l'avvio della DTT (Gruppo D). Il Gruppo di studio E, infine, ha coordinato ed armonizzato i risultati degli altri quattro Gruppi.

Una importante attività ha riguardato lo studio dei possibili scenari operativi per lo sviluppo della DTT sulla base di una serie di ipotesi legate al reperimento delle risorse in frequenza; particolare attenzione è stata data alla fase iniziale del processo di transizione dall'attuale sistema analogico a quello "tutto digitale" individuando due scenari operativi:

Scenario A basato sull'attuazione del Piano Nazionale di Assegnazione delle Frequenze (PNAF) che l'Autorità dovrebbe definire entro il 2002. Il Piano Nazionale del 1997, seppure focalizzato sulla televisione analogica, già riservava 4 frequenze alla televisione digitale terrestre, in particolare il canale 9 in banda VHF ed i canali 66, 67, 68 in banda UHF. Tali frequenze sono però attualmente utilizzate dalle reti televisive analogiche e potranno, presumibilmente, essere disponibili per il digitale terrestre solo dopo l'attuazione del PNAF o nel corso di attuazione dello stesso; comunque non prima di 4-5 anni.

Scenario B basato su uno schema di sviluppo a "macchia di leopardo" che, prescindendo dai tempi per l'attuazione del PNAF, meglio si presta, rispetto allo scenario A, ad accelerare i tempi di avvio della fase di transizione. Si tratterebbe infatti di introdurre il servizio digitale in quelle aree – in particolare i grandi centri urbani – dove già si rendono disponibili o è possibile reperire risorse in frequen-

za. Questo schema richiede tuttavia un attento coordinamento nell'utilizzazione delle frequenze da parte dell'Ente di regolamentazione per tendere a un modello definitivo di Piano digitale in grado di gestire in modo ottimale le frequenze utilizzabili inizialmente con quelle resesi disponibili successivamente.

Allo scopo di fornire alcune linee guida agli operatori del settore, il Libro Bianco riporta i risultati di alcuni esercizi di pianificazione della DTT effettuati con riferimento a possibili scenari introduttivi di servizi su base “nazionale” e “ regionale”.

Nel caso di un servizio nazionale – basato su un multiplex di 5 programmi televisivi oltre a servizi multimediali – sono state valutate le percentuali di popolazione servita su tutto il territorio ricorrendo a 3 diverse configurazioni di rete sia a singola frequenza (SFN) che multifrequenza (MFN). I risultati, relativi alla diffusione del segnale DVB-T in 64-QAM (rate 2/3; Tg=1/4; 8K) – una configurazione di trasmissione digitale che rende disponibile un bit-rate di circa 24 Mbit/s [2] – si possono così sintetizzare:

1-SFN (1 sola frequenza): si stima una copertura dell'87% impiegando 306 trasmettitori in banda III-VHF, oppure 391 trasmettitori in banda V-UHF;

3-SFN (3 frequenze): la copertura si estende al 97%, impiegando rispettivamente 430 e 460 trasmettitori nelle due bande di frequenza;

4-MFN (4 frequenze): si stima una copertura del 93%, impiegando rispettivamente 360 e 400 trasmettitori.

Il Libro Bianco indica inoltre, per un Piano digitale che utilizzi tutti i 55 canali delle bande VHF e UHF, una capacità potenziale di 13÷18 multiplex (o blocchi di diffusione) per area di servizio – a seconda che si adotti una configurazione di rete 4-MFN oppure 3-SFN – con possibilità di differenziare la programmazione a livello regionale/locale. In questo scenario “tutto digitale” si renderebbero disponibili da 40 a 90 programmi televisivi (arricchiti da applicazioni multimediali), a seconda della modalità di trasmissione (3 o 5 programmi per multiplex) e della configurazione di rete, suddivisi tra programmi a diffusione nazionale e programmi a diffusione regionale e locale relativi alle singole aree di servizio.

5.2 La Legge 66/2001 e il Regolamento sulla DTT

La Legge n. 66 del 20 marzo 2001, nata sulla scia del vecchio Ddl 1138, ispirandosi alle indicazioni del Libro Bianco definisce il quadro istituzionale per l'introduzione nel mercato italiano della tecnologia digitale terrestre e fissa al 31/12/2006 il definitivo passaggio dell'intero sistema televisivo dall'analogico al digitale. Questa data, sebbene da molti ritenuta troppo prossima per essere realisticamente rispettata, stante l'attuale occupazione dello spettro radioelettrico destinato alla diffusione televisiva terrestre, accelera di fatto l'avvio di un processo di investimenti e di sviluppo di un settore industriale strategico e pone la basi per una trasformazione radicale dell'intero sistema televisivo nazionale.

La Legge indica che su ciascun “blocco di diffusione” vengano irradiati almeno tre programmi televisivi, destinando la capacità rimanente a servizi multimediali. Raccomanda che l'Autorità nella predisposizione dei piani di assegnazione delle frequenze per la DTT adotti il criterio di migliore e razionale utilizzazione dello spettro radioelettrico prevedendo per i servizi nazionali l'impiego di reti isofrequenziali (SFN) su macro aree di diffusione.

Alla RAI, concessionaria del servizio pubblico radiotelevisivo, è riservato un blocco per la diffusione dei propri programmi televisivi DTT in chiaro. Su ulteriori blocchi di diffusione la concessionaria può operare, sia come fornitore di contenuti e servizi sia come operatore di rete, nel rispetto degli obblighi e delle procedure vigenti.

I soggetti operanti in ambito nazionale, ad eccezione della RAI, non possono differenziare il palinsesto dei loro programmi su base regionale o locale.

Il Regolamento sulla DTT introduce la distinzione fra i soggetti operanti nel nuovo mercato: il fornitore di contenuti, il fornitore di servizi e l'operatore di rete. I rispettivi compiti sono definiti nel pieno rispetto dei principi del pluralismo dell'informazione, di trasparenza, di tutela della concorrenza e di non discriminazione. Il fornitore di contenuti ha la responsabilità editoriale del palinsesto dei programmi; il fornitore dei servizi gestisce in particolare la configurazione del multiplex, l'accesso condizionato e l'EPG; l'operatore di rete provvede alla diffusione del segnale in conformità con le norme tecniche di emissione.

La conseguenza di questa scelta operata dal legislatore dovrebbe portare all'abbassamento delle barriere e dei costi all'ingresso, potendo ciascun operatore specializzarsi e concentrarsi sulla specifica attività che costituisce il proprio punto di forza.

Il lancio della DTT prevede una fase iniziale di sperimentazione. Le abilitazioni possono essere richieste dagli operatori televisivi, eventualmente riuniti in consorzi e con la partecipazione di editori di prodotti e servizi multimediali, fino al 30 marzo 2004. La validità delle abilitazioni cessa il 25 luglio 2005.

A partire dal 31 marzo 2004, i soggetti abilitati potranno richiedere al Ministero delle Comunicazioni la conversione della abilitazione in licenza di operatore di rete limitatamente ai bacini e alle frequenze per i quali erano titolari di abilitazione. A tal fine, dovranno assumere determinati impegni quali, ad esempio, investire in infrastrutture, promuovere accordi commerciali con i fornitori di servizi per agevolare l'utenza relativamente alla diffusione degli apparati riceventi, comunicare eventuali variazioni circa le aree interessate dalla sperimentazione, i siti prescelti per la diffusione e le frequenze utilizzate.

Analogamente, i fornitori di contenuti e di servizi (in chiaro e ad accesso condizionato) dovranno richiedere al Ministero delle Comunicazioni il rilascio delle rispettive autorizzazioni secondo le modalità previste dal Regolamento.

Il Regolamento definisce norme intese a favorire il pluralismo dell'informazione, allargando la partecipazione alla sperimentazione a tutti i soggetti che ne hanno i requisiti. Allo scopo i titolari di almeno due concessioni televisive analogiche hanno l'obbligo di riservare, in ciascun blocco (multiplex) di programmi e servizi, almeno il 40% della capacità trasmissiva alla sperimentazione di altri soggetti a condizioni eque, trasparenti e non discriminatorie.

Un terzo della capacità trasmissiva prevista dal PNAF, dovrà essere riservata ai soggetti titolari di autorizzazione alla fornitura di contenuti che operano in ambito locale.

Inoltre, ad uno stesso soggetto non potranno essere rilasciate autorizzazioni per irradiare, in chiaro o criptato, più del 20% dei programmi digitali nazionali, né gli sarà consentito di irradiare più di un blocco (multiplex) di programmi DTT su una stessa area, in ambito locale.

Il Regolamento, nella fase attuale, definisce solo linee normative di fondo intese a disciplinare gli aspetti essenziali del passaggio dal regime analogico a quello digitale; a successivi provvedimenti, che potranno essere emanati alla fine del periodo di sperimentazione, sarà lasciato il compito di determinare un più specifico quadro normativo adeguato all'evoluzione del sistema e del mercato.

5.3 Il terminale d'utente

Un importante elemento nel processo di conversione al digitale terrestre riguarda lo standard dei ricevitori. La normativa preliminare, elaborata a seguito delle indicazioni fornite dal Libro Bianco deriva da un largo consenso da parte dei costruttori e degli operatori del settore ed è riportata nella delibera 216/2000 dell'Autorità. Fra le funzionalità che più direttamente possono condizionare lo sviluppo di un mercato orizzontale, e per le quali si raccomanda una "soluzione aperta" a tutti i soggetti, si citano: il sistema di navigazione, la guida elettronica ai programmi (EPG) e l'interfaccia per le applicazioni (API). EPG ed API rappresentano il valore aggiunto dei nuovi ricevitori digitali per la fruizione dei servizi multimediali e interattivi. Lo standard elaborato non esclude possibili adeguamenti sulla base dei risultati della fase di sperimentazione.

Fig. 9 - Incremento di costo dei ricevitori digitali commerciali rispetto allo "zapper base"

Attualmente, nel contesto dei servizi di televisione digitale via satellite, la Legge n.78/1999 sul "decoder unico", consente agli utenti in possesso di decoder relativo ad uno dei due operatori – Telepiù/D+ e Stream – di ricevere anche l'offerta televisiva in abbonamento dell'altro operatore. Tuttavia, a causa dell'adozione di API proprietarie – MediaHighway e OpenTV – rimangono comunque inaccessibili, da parte di un dato decoder, tutti i servizi aggiuntivi – quali ad esempio l' EPG, i servizi interattivi e multimediali, la Pay-per-view, ecc. – forniti dalla piattaforma dell'altro operatore.

Sembra questo un motivo sufficiente per considerare l'importanza della piattaforma MHP quale standard aperto per tutti i futuri servizi televisivi digitali, satellitari e terrestri, e promuoverne l'impiego come piattaforma comune già nella fase di sperimentazione della DTT prevista dal Regolamento.

Per quanto riguarda la disponibilità dei terminali riceventi i principali produttori – Philips, Nokia, Panasonic, Sony, Grundig – hanno iniziato l'immissione sul mercato di prodotti MHP già a partire dal 2002. Gli stessi operatori, per verificare l'interoperabilità dei ricevitori, hanno costituito un "MHP Test Consortium" che opera in stretto contatto con un gruppo di lavoro del DVB, incaricato di validare la specifica tecnica MHP.

Sulla base di una recente indagine di mercato, i cui risultati sono sintezizzati in figura 9, il costo all'utente dei ricevitori MHP di prima generazione, in versione Enhanced Broadcasting, sarà confrontabile con quello dei ricevitori MediaHighway/Open TV;

entro il 2005 l'incremento di costo rispetto allo "zapper base" si posizionerà intorno a 20 ÷ 40 ECUs per le versioni Enhanced Broadcasting e Televisione Interattiva, rispettivamente.

6. Conclusioni

L'introduzione della televisione digitale terrestre rappresenta una tappa fondamentale del processo di conversione tecnologica dell'intero sistema radiotelevisivo nel nostro Paese. In questo contesto fortemente evolutivo, la DTT è destinata a svolgere un ruolo centrale a motivo della sua facilità ed economicità di ricezione, alla "universalità" del servizio stesso – prevalentemente rivolto alla grande utenza – ed alla possibilità di integrare e complementare l'offerta dei canali satellitari e via cavo, potendo soddisfare globalmente le diverse tipologie dei servizi: nazionali, regionali e locali. La possibilità di estendere la ricezione anche ai terminali portatili e, in prospettiva all'utenza mobile, è un altro fattore premiante.

Il quadro normativo nazionale, definito dalla Legge n.66/2001 e dal relativo Regolamento, conferisce stabilità al sistema e individua i meccanismi che, attraverso la fase iniziale di sperimentazione, promuovono il processo di conversione alla tecnologia digitale e lo sviluppo dei nuovi mercati. Tuttavia, il successo di questo ambizioso progetto sembra condizionato dal verificarsi di alcune condizioni:

la disponibilità delle risorse in frequenza e di ricevitori commerciali a costi accessibili;

il rapido avvio delle procedure di autorizzazione/licenza dei soggetti interessati;

l'emissione di provvedimenti legislativi a sostegno dell'utenza e degli operatori che investono nelle nuove infrastrutture.

Nello scenario fortemente competitivo che caratterizza il broadcasting digitale, in cui l'offerta televisiva sarà sempre più integrata con arricchimenti di carattere interattivo e multimediale, fondamentale è la convergenza di tutti i soggetti verso l'impiego di una piattaforma "aperta" sin dalla fase iniziale di sperimentazione, al fine di favorire lo sviluppo di un mercato orizzontale a beneficio degli operatori e degli utenti; la piattaforma DVB-MHP (Multimedia Home Platform) soddisfa tale requisito e, inoltre, risponde agli obiettivi della Direttiva del Parlamento Europeo intesa a garantire il servizio universale e il pluralismo dei media nel quadro della nuova società dell'informazione.

Varie sperimentazioni DTT sono da tempo in corso da parte di RAI – a Torino, Roma e Palermo – Mediaset e Telepiù/D+ su varie aree del territorio nazionale. La RAI, in particolare, attraverso il test-bed di Torino [10], [11], [12], si appresta a valutare globalmente le prestazioni della piattaforma DVB-MHP per servizi multimediali e interattivi, sia sul piano tecnologico e operativo che su quello editoriale e di produzione dei contenuti, con l'obiettivo di contribuire alla definizione dei requisiti di servizio e dei modelli di business.

Bibliografia

1. M. Cominetti, A.Morello: "Il sistema europeo (DVB-S) per la diffusione televisiva da satellite"; Elettronica e Telecomunicazioni n°3, 1994

2. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin: "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002

3. M.Cominetti, A.Polo, V.Sardella: "Una nuova soluzione per la distribuzione di segnali DVB negli impianti centralizzati d'antenna"; Elettronica e Telecomunicazioni n°2; 2000

4. V.Mignone, A.Morello: "Il nuovo standard DVB per il DSNG ed altri collegamenti di contributo via satellite"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1; 2000

5. M.Cominetti: "Il broadcasting digitale". ASSINFORM Rapporto sull'Informatica e le Telecomunicazioni 2000; pagg. 217 ÷ 230

6. M.Cane; D.Gibellino: "Multimedia Home Platform: uno standard comune per servizi e terminali domestici"; Elettronica e Telecomunicazioni n°3; 2000

7. NorDig: "Digital Integrated Receiver Decoder Specification for use in cable, satellite and terrestrial networks"; NorDig I, version 1.3

8. CEPT: " The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)"; Chester, July 1997

9. Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni: "Libro Bianco sulla televisione digitale terrestre"; Settembre 2000

10. M.Cominetti, A.Morello, R.Serafini: "Current plans for DTT implementation in a densely utilised frequency spectrum" ; Montreux TV Symposium, June 1999

11. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002.

12. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone: "Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre"; Elettronica e Telecomunicazioni n°1, 2002.

ACRONIMI	
API	Application Programming Interface
ATSC	Advanced Television Systems Committee
CA	Conditional Access
COFDM	Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DAB	Digital Audio Broadcasting
DCT	Discrete Cosine Transform
DigiTAG	Digital Terrestrial Action Group
DSM-CC	Digital Storage Media - Command and Control
DSS	Digital Satellite System (Hughes)
DTH	Direct-to-Home
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-C	DVB - cavo
DVB-S	DVB - satellite
DVB-T	DVB - terrestre
DVB-DSNG	DVB - Digital Satellite News Gathering
DVD	Digital Versatile Disc
EACEM	European Association of Consumer Electronics Manufacturers
EBU	European Broadcasting Union
EICTA	European Information, Communications and Consumer Electronics Industry
EPG	Electronic Programme Guide
ETSI	European Telecommunications Standard Institute
GPRS	General Packet Radio Service
HTML	Hyper Text Mark-up Language
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting (Terrestrial)
MATV	Master Antenna TV
MFN	Multi Frequency Network
MHP	Multimedia Home Platform
MPEG	Motion Picture Expert Group
MP@ML	Main Profile@Main Level
OpenCable	Normativa CableLabs (USA)
PC	Personal Computer
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PNAF	Piano Nazionale delle Frequenze
PSTN	Packet Switched Telephone Network
PVR	Personal Video Recording
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
r.f.	radiofrequenza
SFN	Single Frequency Network
SMATV	Satellite Master Antenna TV
UHF	Ultra High Frequencies
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Systems
VHF	Very High Frequencies

Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio

ing. Paolo Benvenuto **Forni,**
ing. Silvio **Ripamonti,**
ing. Vincenzo **Sardella**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

Nel quadro dell'attività rivolta all'introduzione dei futuri servizi televisivi digitali sulle reti terrestri (DVB-T) [1] il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della RAI (CRIT), in stretta collaborazione con RaiWay, ha avviato da tempo una sperimentazione, differenziata per aree geografiche e per servizi, i cui primi risultati sono stati presentati dalla RAI in ambito al Comitato Nazionale per lo sviluppo dei sistemi digitali costituito dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni [2], ed in ambito internazionale [3], [4].

Il primo esperimento pilota è stato avviato a Torino a partire dal febbraio 1998, con lo scopo principale di valutare sul campo le prestazioni del DVB-T, ponendo particolare attenzione alla capacità trasmissiva, alla qualità del servizio, al "bouquet" di programmi (audio, video, dati) offerti: sono questi i parametri che consentono di identificare la miglior configurazione di servizio in grado di interessare la più vasta utenza. Altre aree di sperimentazione sono state allestite a Roma e a Palermo, direttamente a cura di RaiWay; un secondo test-bed curato da RAI-CRIT e RaiWay è in fase di realizzazione in Valle d'Aosta.

L'articolo analizza le configurazioni delle reti pilota a Torino (canali 28 e 66) e in Valle d'Aosta (canale 64), con particolare attenzione ai parametri adottati per la codifica del segnale di sorgente e per la trasmissione; descrive sinteticamente i criteri per la stima della copertura del servizio, con riferimento ai metodi ed alle procedure adottati in ambito CEPT, sia per reti a singola frequenza (SFN Single Frequency Network) che per reti convenzionali multifrequenza (MFN Multi Frequency Network), avvalendosi di modelli propagativi avanzati integrati con modelli numerici del territorio; riporta le previsioni della copertura radioelettrica del servizio DVB-T sperimentale. Inoltre sono presentati i risultati di misure del campo elettromagnetico (e.m.) e della copertura percentuale eseguite nell'area torinese, con particolare riguardo alla ricezione fissa e in movimento su autoveicoli.

Sommario

L'articolo riporta i principali risultati della sperimentazione pre-operativa di televisione digitale terrestre (DVB-T) condotta nell'area pilota di Torino e illustra l'architettura della rete DVB-T in Valle d'Aosta che costituirà prossimamente una nuova area di sperimentazione della Rai.

La sperimentazione pre-operativa, descritta nell'articolo, ha permesso di effettuare valutazioni tecniche sulle effettive prestazioni del sistema DVB-T in area di servizio, focalizzate sulla ricezione fissa, portatile e mobile. Queste indagini, arricchite dai risultati di valutazioni tecniche effettuate in laboratorio [5] forniscono rilevanti informazioni sulle prestazioni del sistema DVB-T in vista dell'introduzione del servizio operativo.

2. Criteri di valutazione delle coperture

La copertura di un impianto o di una rete di impianti di diffusione viene calcolata suddividendo l'area geografica su cui opera il singolo impianto (o la rete) in un numero di zone (aree locali) sufficientemente elevato in modo da poter evidenziare la variazione spaziale del campo sull'area geografica considerata. E' necessario che tali zone siano sufficientemente piccole da potersi considerare statisticamente rappresentate in termini di campo elettrico ricevuto fornendone il valore in un punto dell'area (p. es. al centro) e la percentuale di tutte le possibili postazioni riceventi omogenee (p. es. tutte fisse) localizzabili nella singola area locale per cui tale valore risulta superato. Nel caso in cui la percentuale di superamento corrisponda al 50 %, il valore di campo calcolato corrisponde alla media dei valori di campo riscontrabili sulle locazioni nell'area.

La percentuale di locazioni riceventi appartenenti all'area locale per cui risulta superato il valore di campo minimo richiesto dal servizio di diffusione televisiva, è denominata "percentuale di località".

Dal momento che i sistemi a modulazione numerica sono caratterizzati da un'eccellente qualità ma subiscono un brusco degrado allorchè viene raggiunta la soglia di sensibilità del sistema, per essi si richiede una disponibilità del servizio (per località e per percentuale di tempo) superiore ai requisiti tipici della televisione analogica, per cui si specifica una disponibilità per il 50% del tempo e per il 50% delle località. Tipicamente per la televisione digitale terrestre [6] è richiesta la disponibilità per il 99% del tempo mentre la disponibilità per località viene differenziata secondo la qualità: una copertura è considerata buona se caratterizzata da una disponibilità per il 95% delle località, accettabile per disponibilità del 70%. Generalmente si preferisce assicurare una disponibilità per il 95% delle località nel caso di ricezione fissa con antenna direttiva sul tetto, ed accettare una disponibilità per il 70% delle località nel caso di ricezione portatile all'interno delle abitazioni.

La valutazione della copertura di un servizio diffusivo richiede quindi il calcolo preventivo del campo prodotto da uno o più impianti trasmittenti, in termini di campo minimo richiesto per soddisfare i requisiti di qualità tipici del servizio. La valutazione dovrebbe possibilmente avvenire considerando tutti gli effetti perturbanti presenti, quali attenuazioni da ostacoli ed interferenze.

Il calcolo della copertura di un impianto trasmittente avviene mediante algoritmi in grado di stimare il campo prodotto su un'area geografica predeterminata, note le caratteristiche del sistema radiante, ovvero l'ERP (Equivalent Radiated Power) irradiata nelle varie direzioni, e l'orografia dell'area attraverso una base dati altimetrica. Generalmente sono utilizzati metodi predittivi in grado di stimare la copertura nel 50% delle località; si considera servita un'area laddove sia stimato un campo e.m. a 10 m dal suolo derivato dal valore

Tabella 1 - Campo minimo richiesto per utilizzare metodi predittivi con stima nel 50% delle località nella valutazione dei servizi DVB-T				
Canale	Modulazione	$E_{min(\text{ a 10 mt})}$ (50,50) [dB(μV/m)]	Ricezione	Disponibilità (% loc.)
64	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	81	Portatile indoor piano terra	70
64	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	57,3	Fissa sul tetto	95
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	81	Portatile indoor piano terra	70
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	57,5	Fissa sul tetto	95

Tab. 1 - Campo minimo richiesto per utilizzare metodi predittivi con stima nel 50% delle località nella valutazione dei servizi DVB-T

minimo del rapporto portante/rumore (C/N) specifico del sistema comprensivo di un margine di implementazione (ad es. C/N=17.1 dB + 3 dB nel caso di 64QAM 2/3). Il valore del campo e.m. richiesto va maggiorato da coefficienti correttivi statistici al fine di garantire valida la stima per la reale quota rispetto al suolo a cui si trova l'antenna ricevente e la percentuale di località per cui si intende garantire il servizio.

Nel caso di una rete a singola frequenza (SFN), in cui tutti gli impianti irradiano lo stesso programma sul medesimo canale, la copertura della rete può essere significativamente più estesa della somma delle coperture dei singoli impianti. Ciò avviene quando i vari contributi di segnale provenienti dai diversi impianti costituenti la rete giungono al ricevitore secondo percorsi che comportano ritardi inferiori all'intervallo di guardia tipico del modo adottato (variabili tra 28 e 224 ms) e danno luogo ad un livello di segnale complessivo di energia sufficiente a garantirne la ricezione con una qualità accettabile [7].

La stima della copertura di una rete SFN prevede il calcolo della copertura dei singoli impianti e la valutazione della copertura complessiva di rete mediante l'applicazione di un modello per la combinazione degli echi.

Dipendentemente dalla tipologia di servizio, variano la quota dell'antenna ricevente (tipicamente 10 m per la ricezione fissa con antenna direttiva sul tetto, ed 1,5 m per la ricezione mobile) e l'intensità di campo minimo richiesto al ricevitore (secondo la banda e le caratteristiche di modulazione adottate). La disponibilità del servizio è stabilita in sede di progetto a seconda della tipologia di ricezione preferenziale (fissa, portatile o mobile). In tabella 1 sono riportati i campi minimi richiesti alla quota di 10 m tali da assicurare il servizio DVB-T, in assenza di interferenza, per le disponibilità spaziali (70% e 95%) riportate alla quota di fruizione del servizio (piano

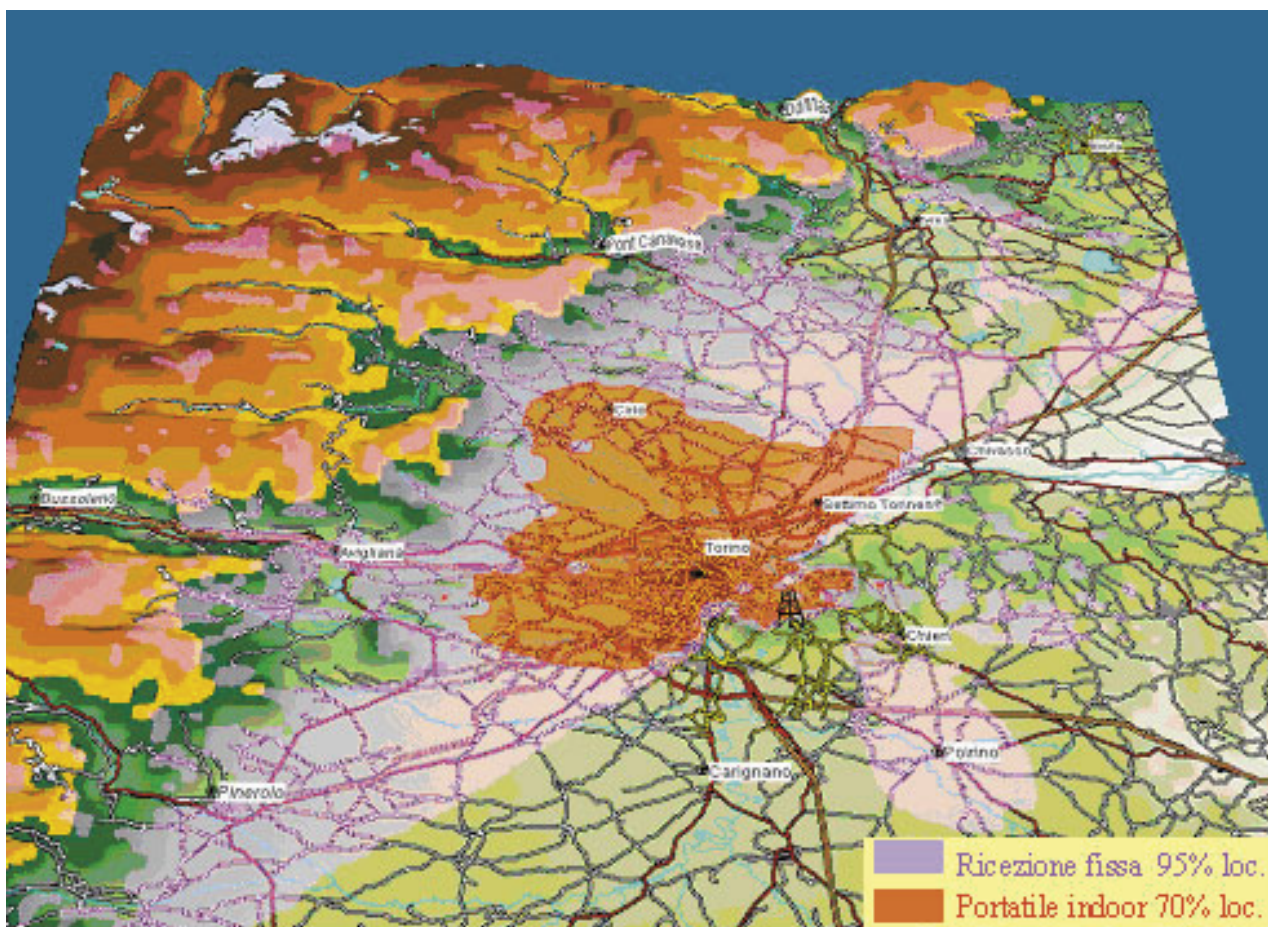



Fig. 1 - Copertura Im-pianto DVB-T di Torino Eremo sul canale 66.

terra, tetto) sui canali 66 e 64 oggetto delle sperimentazioni in corso in Piemonte e Valle d'Aosta. Tali campi sono stati calcolati applicando le formulazioni adottate in sede CEPT [7].

In figura 1 è riportata la stima della copertura dell'impianto di Torino Eremo sul canale 66, per i casi di ricezione fissa, e portatile indoor a piano terra. La figura 2 riporta la stima delle coperture fissa ed indoor al piano terra, relativamente alla rete SFN della Valle d'Aosta sul canale 64 (Impianti di Col de Courtil, St. Vincent, Blavy, Gerdaz, St. Nicolas) ottenute mediante un software appositamente sviluppato [8], basato sull'impiego di un GIS (Sistema informativo Geografico).

3. Sperimentazione pilota in Torino

3.1 Configurazione di servizio

Nel febbraio del 1998 Rai - CRIT, in collaborazione con la Divisione Trasmissione e Diffusione (ora RaiWay) ha dato inizio alle prime trasmissioni sperimentali di televisione digitale terrestre (DVB-T) in Italia. La piattaforma di generazione dei segnali è stata successivamente ampliata per la diffusione di un maggior numero di programmi e per includere applicazioni multimediali e di data broadcasting.

La catena di codifica e di multiplazione consiste attualmente di 5 codificatori MPEG-2

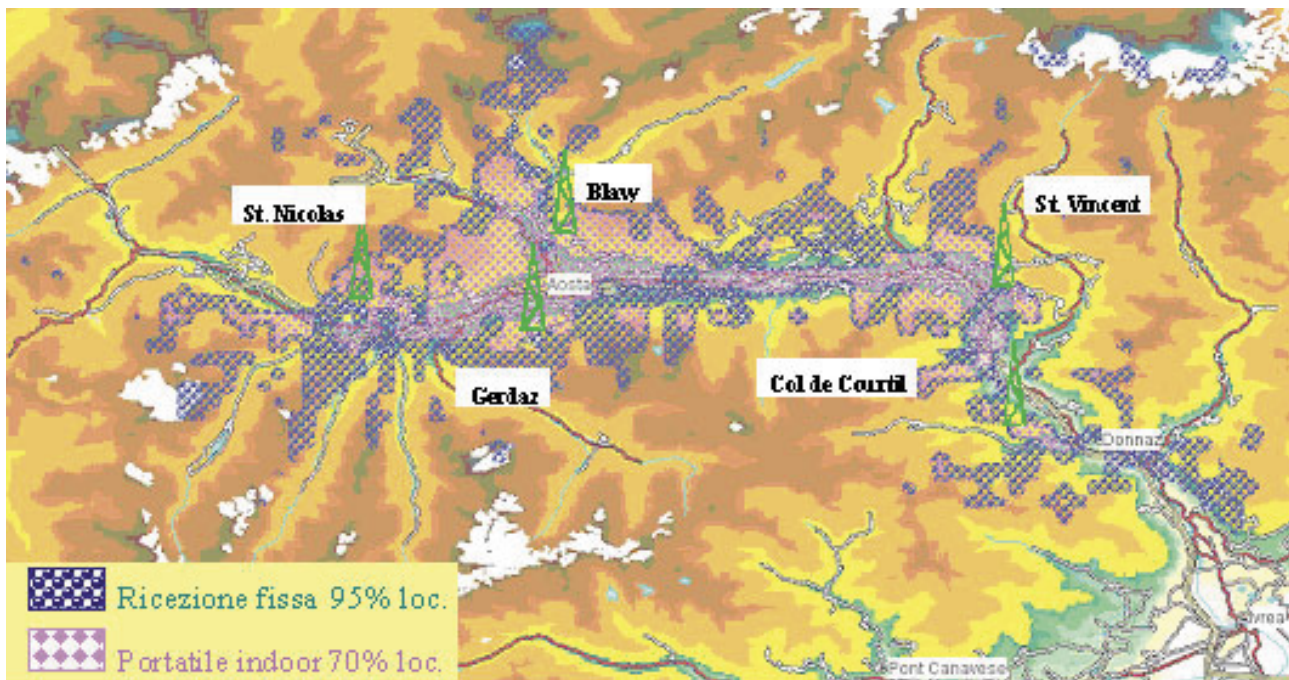



Fig. 2 - Copertura Rete DVB-T in Valle d'Aosta

statistici, un codificatore MPEG-2 a bit-rate costante, un re-multiplexer per fornire servizi EPG (Electronic Programme Guide) e MHP (Multimedia Home Platform), un generatore di informazioni SI (System Information) e PSI (Programme Specific Information).

Il multiplatore riceve i flussi numerici dei singoli programmi (PES: Packetised Elementary Stream) dai codificatori e i servizi multimediali dal Centro Servizi Dati e genera due Transport Stream (TS) con bit-rate di 12,06 e 24,13 Mbps, trasportanti ciascun un "bouquet" di programmi video, audio, dati. Un Personal Computer controlla i parametri della catena di codifica e multiplazione, come evidenziato in figura 3.

I due bouquet sono quindi trasferiti al Centro Trasmittente di Torino-Eremo, situato ad una distanza di circa 5 km dal CRIT e ad una elevazione di circa 500 m dall'area circostante, per mezzo di un ponte radio digitale. Il trasporto avviene in tecnologia

Fig. 3 - Catena di co-difica e multiplazione per il DVB-T

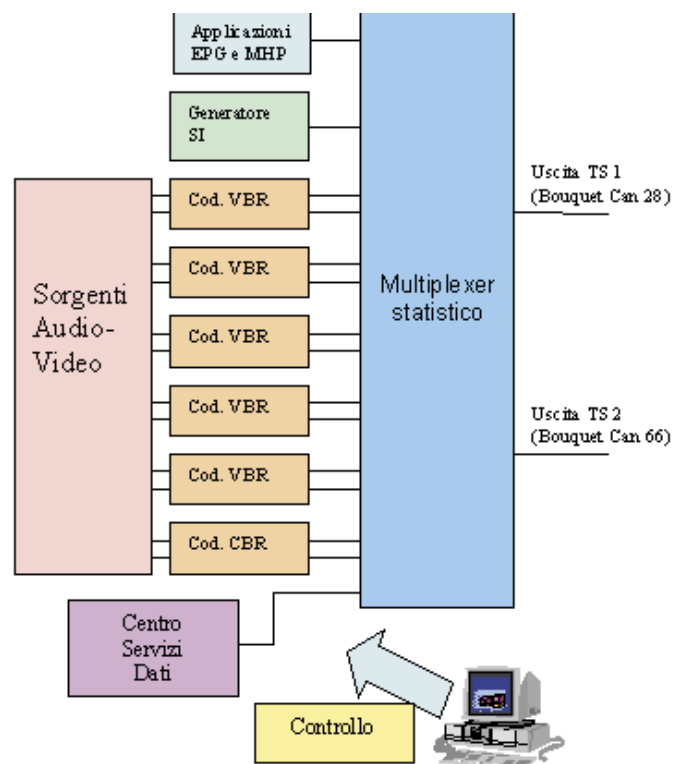



Tabella 2 - Caratteristiche dei segnali DVB-T in diffusione dal trasmettitore di Torino-Eremo				
Canale	Modulazione	Bit-rate (Mbps)	ERP (W)	Pol.
28	16QAM; 2k; 1/2; 1/32	12,06	300	V
66	64QAM; 8k; 2/3; 1/32	24,13	2000	H

Tab. 2 - Caratteristiche dei segnali DVB-T in diffusione dal trasmettitore di Torino-Eremo

Tabella 3 - Bouquet DVB-T sul canale 28		
Programma	Bit-rate (Mbps)	
	Video	Audio
RaiNews24	2 (CBR)	0,192
RaiSport	2÷5 (VBR)	0,192
RaiEducational	2÷5 (VBR)	0,192
Canali radio	-	0,384
Dati	1,5	

Tab. 3 - Bouquet DVB-T sul canale 28

Tab. 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66

Tabella 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66			
Programma	Bit-rate (Mbps)		
	Video		Audio
RaiUno	2÷6 (VBR)	Multiplex statistico: 20 Mbps	0,192
RaiDue	2÷6 (VBR)		0,192
RaiTre	2÷6 (VBR)		0,192
RaiSport	2÷8 (VBR)		0,192
RaiEducational	2÷8 (VBR)		0,192
RaiNews24	2 (CBR)		0,192
Dati	1,5		

ATM (Asyncronous Transfer Mode) tramite un tributario a 45 Mbps di un ponte radio SDH (Syncronous Digital Hierarchy), utilizzando una coppia di Adattatori di Rete (Network Adapter) ATM.

Al Centro Trasmittente i segnali dei due bouquet sono inviati a due modulatori COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) che alimentano due indipendenti catene trasmissive in banda UHF, una operante sul canale 28 (frequenza centrale: 530 MHz) e l'altra operante sul canale 66 (frequenza centrale: 834 MHz).

La tabella 2 riporta i parametri di modulazione e diffusione per le due catene. I rapporti C/N teorici su canale gaussiano, alla soglia di corretta ricezione, sono di 8,8 dB e 16,5 dB rispettivamente per le modulazioni 16QAM-1/2 e 64QAM-2/3.

Lo schema di modulazione adottato per il canale 66 è molto efficiente in termini di capacità e consente di trasmettere fino a 6 programmi televisivi (vedi tabelle 3 e 4). Questa configurazione, che permette una ampia e diversificata offerta di servizi, è particolarmente orientata alla grande utenza con ricezione fissa. Il bouquet contiene i programmi di RaiUno, RaiDue e RaiTre; ciò consente di effettuare una efficace valutazione comparativa della qualità e

robustezza dei segnali televisivi terrestri irradiati sui canali analogici e digitali.

I due trasmettitori sui canali 28 e 66 utilizzano differenti sistemi radianti, posizionati sullo stesso traliccio.

Dal momento che nell'area di servizio DVB-T i canali adiacenti ai canali 28 e 66 sono occupati da servizi televisivi analogici PAL, le catene trasmissive includono opportuni filtri RF che assicurano adeguati rapporti di protezione verso tali servizi. Gli stessi filtri garantiscono inoltre la protezione verso i canali "taboo", anch'essi occupati da servizi analogici nella stessa area.

E' allo studio la configurazione finale della piattaforma DVB-T sulla rete pilota nell'area torinese, che consisterà in una piccola rete SFN (Single Frequency Network) che include un secondo trasmettitore presso il CRIT, probabilmente sul canale 28, per estendere la copertura nell'area sud-est di Torino, schermata dalla collina dal trasmettitore principale. Le problematiche relative all'inserimento dell'adattatore SFN nella rete di collegamento in ponte radio tra CRIT e Centro Trasmittente sono state, per il momento, affrontate tramite sperimentazione in laboratorio.

3.2 Prestazioni del sistema DVB-T in area di servizio

Sono state condotte sperimentazioni in campo, focalizzate su valutazioni tecniche della qualità del servizio in ricezione fissa sul canale 66 e in ricezione mobile sul canale 28. I principali risultati sono riportati nel seguito.

3.2.1 Ricezione fissa (canale 66)

E' stato utilizzato un furgone equipaggiato con l'opportuna strumentazione e con un'antenna direttiva log-periodica

Fig. 4 - Automezzo attrezzato per le misure in ricezione fissa

(guadagno di 6 dB) montata su un palo estensibile fino ad una elevazione di 20 m dal suolo (figura 4). Un Personal Computer registra i parametri di misura ed i dati di posizione del mezzo ricavati da GPS (Global Positioning System).

I principali parametri di valutazione sono stati: la misura del campo elettromagnetico (E dB(mV/m)), la sua distribuzione cumulativa riferita alle previsioni di servizio distribuzione e il margine di ricezione, valutato come attenuazione (dB) da introdurre sul segnale RF per raggiungere la soglia di corretta ricezione QEF (Quasi Error Free).

Le misure di campo elettromagnetico sono state effettuate ad una elevazione di 10 m rispetto al terreno in conformità con la raccomandazione ITU 370, calcolando il valore del campo attraverso misure di potenza e considerando una stratificazione

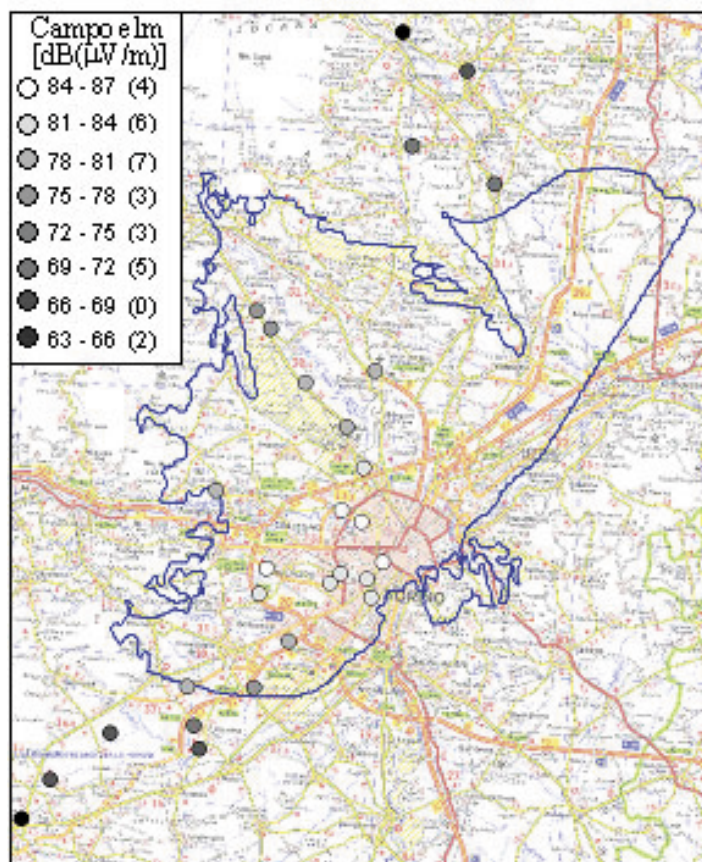
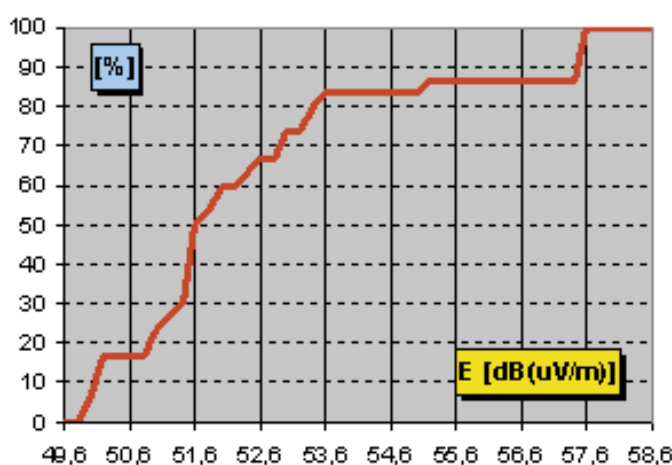



Fig. 5 - Misure di cam-po elettromagnetico nell'area di servizio del trasmettitore DVB-T sul canale 66

Fig. 6 - Distribuzione cumulativa dei valori di campo elettromagnetico alla soglia di ricezione

di ± 1 lunghezza d'onda intorno ai 10 metri di elevazione.

La figura 5 riporta i risultati delle misure di campo effettuate in varie località dell'area di servizio del trasmettitore DVB-T sul canale 66. Fra parentesi sono indicati i numeri di punti di misura nella fascia di campo e.m. relativo. L'area interna al contorno blu rappresenta l'area in cui, secondo i presupposti CEPT [7], la ricezione portatile indoor dovrebbe essere possibile per il 70% delle località.

In conclusione, in tutti i punti di misura la ricezione DVB-T è stata affidabile, con margini adeguati, ed i risultati di misura hanno confermato con buona approssimazione le previsioni di campo e di criteri di valutazione della CEPT. La figura 6 riporta la distribuzione cumulativa dei risultati delle misure.

Il valore di campo minimo alla soglia di ricezione è risultato compreso tra 50 e 57,5 dB(mV/m). La differenza tra i valori trovati ed il valore assunto dalla CEPT (48 dB(mV/m)) può essere dovuta sia alle caratteristiche del canale nei vari punti di misura, che si discosta dal modello teorico, sia alla eventuale presenza di interferenti co-canale.

3.2.2 Ricezione mobile (canale 28)

Il sistema DVB-T è stato progettato per la ricezione fissa, con antenna direttiva posta sul tetto dell'abitazione, e per la ricezione portatile, con antenna omnidirezionale a stilo posta direttamente sul ricevitore. Dal momento che il canale di trasmissione non può essere assunto completamente stazionario, soprattutto nel caso di ricezione portatile, a causa dei movimenti di persone e oggetti che riflettono il segnale attorno all'antenna ricevente, è stato necessario, nel progetto del sistema, tenere in considerazione lente variazioni della risposta

in frequenza del canale. Il sistema DVB-T utilizza, per la corretta demodulazione del segnale su un canale di trasmissione variante nel tempo, portanti pilota che non trasportano informazione, ma vengono utilizzate dal ricevitore per una stima dinamica del canale. Sebbene lo scopo di queste portanti pilota sia quello di permettere al ricevitore di inseguire variazioni lente della risposta del canale tipiche della ricezione portatile, la scelta di una configurazione di trasmissione particolarmente robusta (ad esempio 16QAM-2k, rate 1/2 o addirittura QPSK-2k, rate 1/2) consente in pratica di inseguire anche variazioni veloci, associate alla ricezione mobile, grazie alla elaborazione del segnale nel ricevitore.

Infatti, grazie alla flessibilità del sistema DVB-T che permette diverse configurazioni operative, è opportuno adottare, per la ricezione mobile, parametri trasmissivi che assicurino elevata robustezza al segnale a scapito però di una riduzione del bit-rate utile per il bouquet di programmi. I test di ricezione effettuati in movimento sul canale 28 sono quindi stati condotti utilizzando i parametri di modulazione specificati nella tabella 2.

Fig. 7 - Auto attrezza-ta per le misure in ricezione mobile

E' stata quindi attrezzata un'auto con una antenna omnidirezionale, posta a circa 2 m di altezza (figura 7), equipaggiata con un banco di misura ed acquisizione dati gestito da personal computer.

Il sistema di misura ha permesso la rilevazione delle interruzioni del servizio, valutate sul segnale DVB-T visualizzato sullo schermo di un televisore installato a bordo, correlandoli con gli andamenti della potenza del segnale all'ingresso

Fig. 8 - Percorso N° 1, in area urbana

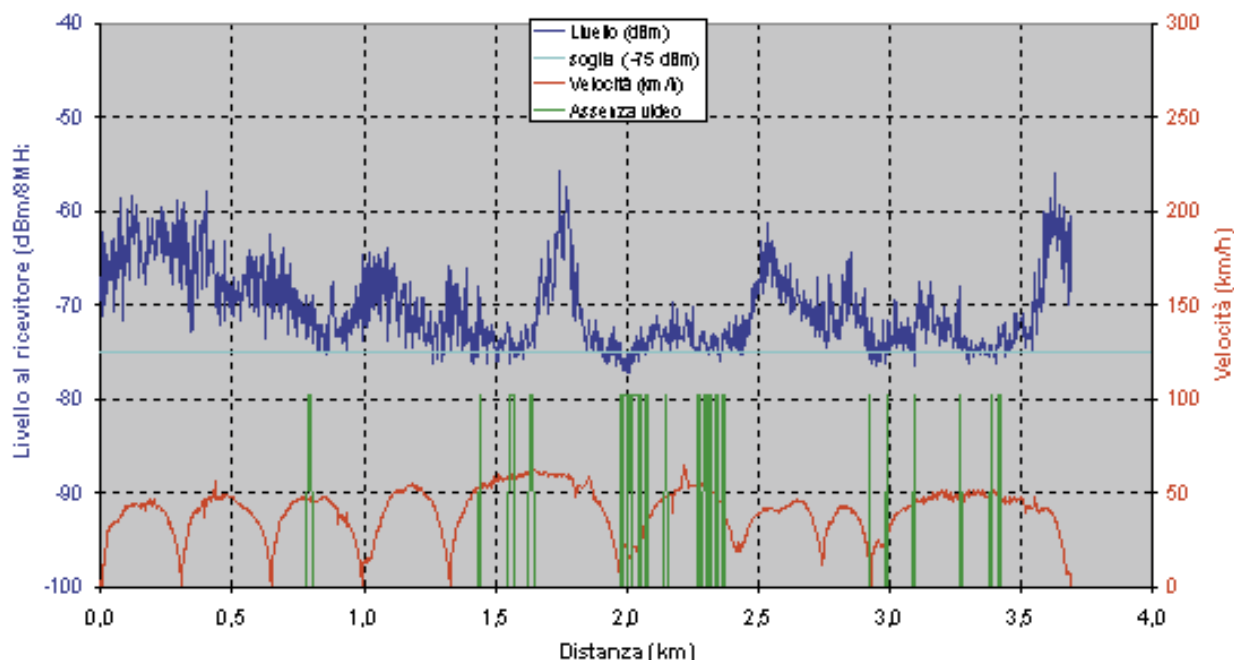



Fig. 9 - Misure relative al percorso N° 1.

del ricevitore e della velocità dell'auto in funzione della distanza lungo il percorso di prova. L'indagine ha finora interessato quattro itinerari, rappresentativi di diverse condizioni di ricezione in area urbana ed extraurbana, per una distanza complessiva di 110 km. I risultati dettagliati delle misure sono riportati in [9].

La figura 8 rappresenta il primo dei quattro percorsi, interamente situato in area urbana, mentre la figura 9 riporta il relativo grafico dei parametri misurati. La linea blu rappresenta il livello del segnale all'ingresso del ricevitore (in dBm su una banda di 8 MHz), la linea rossa riporta la velocità istantanea dell'auto (in km/h), mentre i segmenti verticali in verde indicano le interruzioni del servizio.

I risultati complessivi di copertura del servizio sono riportati in tabella 5, dove vengono indicate le percentuali dei vari percorsi in cui si è rilevata la continuità del servizio. Si osserva che sui percorsi 2 e 3 extra-urbani ed autostradali la velocità del mezzo si è mantenuta mediamente intorno a 100 km/h.

Dall'analisi dei grafici relativi ai vari percorsi, riportati in [9], è stata individuata sperimentalmente una soglia di - 75 dBm per la potenza in ingresso al ricevitore,

Tab. 5 - Percentuale di servizio per i vari percorsi

Tabella 5 - Percentuale di servizio per i vari percorsi

Percorso	% di copertura
1 – Urbano	95
2 – Autostradale	80
3 – Extraurbano	93
4 – Urbano	84

corrispondente ad un valore di campo elettromagnetico di circa 55 dB(mV/m), in grado di garantire un buona qualità del servizio. Questo valore è di circa 7 dB maggiore rispetto alla soglia di corretta ricezione stabilita dalla CEPT per il canale Rayleigh [7], che è rappresentativo della ricezione con antenna omnidirezionale. Il peggioramento è da attribuirsi in parte all'effetto Doppler e in parte al contributo degli echi corti, particolarmente sui percorsi in area urbana. E' stato infatti dimostrato sia sperimentalmente che con simulazioni al calcolatore [10] che in presenza di echi corti rispetto alla durata del simbolo COFDM e di elevato livello (C/I » 0 dB, ritardo £ 200 ns), quali possono essere quelli generati da ostacoli vicini in assenza di raggio principale, il degradamento in termini di rapporto C/N risulta peggiore di circa 5-6 dB rispetto a quello originato da echi più lunghi, sempre però all'interno dell'intervallo di guardia.

Un secondo risultato ottenuto dalle misure in movimento riguarda le variazioni del campo elettromagnetico su aree locali (dell'ordine di 100-200 m) che possono essere così sintetizzate:

- variazioni massime di circa 10 dB e 15 dB sono state misurate in aree suburbane e urbane, rispettivamente, in condizioni di visibilità del trasmettitore;
- in presenza di ostacoli che schermano il trasmettitore (ad esempio edifici elevati in area urbana) le variazioni possono essere anche superiori a 20 dB, in corrispondenza al passaggio tra la condizione di schermatura e condizione di visibilità del trasmettitore. In questi casi si è riscontrata l'interruzione del servizio.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione in ricezione mobile, nella configurazione 16QAM che rende disponibile un bit-rate utile di circa 12 Mbit/s, sono incoraggianti e confermano la possibilità di introdurre servizi DVB-T all'utenza mobile, a condizione che vengano utilizzati schemi di modulazione robusti. Come contropartita, viene ridotta la capacità complessiva di trasmissione del canale rispetto allo schema di modulazione 64QAM, utilizzato per la ricezione fissa, che rende disponibile un bit-rate di circa 24 Mbit/s.

Sono allo studio presso Rai-CRIT [10] sistemi riceventi che impiegano sull'automezzo antenne dotate di agilità direzionale, in grado cioè di operare sulla base della diversità spaziale, riducendo significativamente il degradamento del segnale ricevuto, imputabile alle condizioni di ricezione variabili durante il percorso.

L'impiego di questi sistemi di ricezione a bordo potranno contribuire a migliorare la qualità del segnale ricevuto.

4. Rete pilota DVB-T in Valle d'Aosta

Rai–CRIT, in collaborazione con RaiWay, ha in corso di allestimento una rete DVB-T in Valle d'Aosta sul canale 64 (frequenza centrale = 818 MHz), che prevede 5 impianti trasmittenti in rete SFN nelle località di Gerdaz, St. Vincent, Col de Courtil, Blavy e St. Nicolas, come evidenziato in figura 10. La configurazione di rete è molto simile a quella già in esercizio sin dal 1995 per il servizio DAB (Digital Audio Broadcasting). Le potenze di apparato degli impianti trasmittenti sono le seguenti:

· St. Vincent: 500 W rms.
· Gerdaz: 500 W rms.
· Col de Courtil: 100 W rms.
· Blavy: 50 W rms.
· St. Nicolas: 50 W rms.

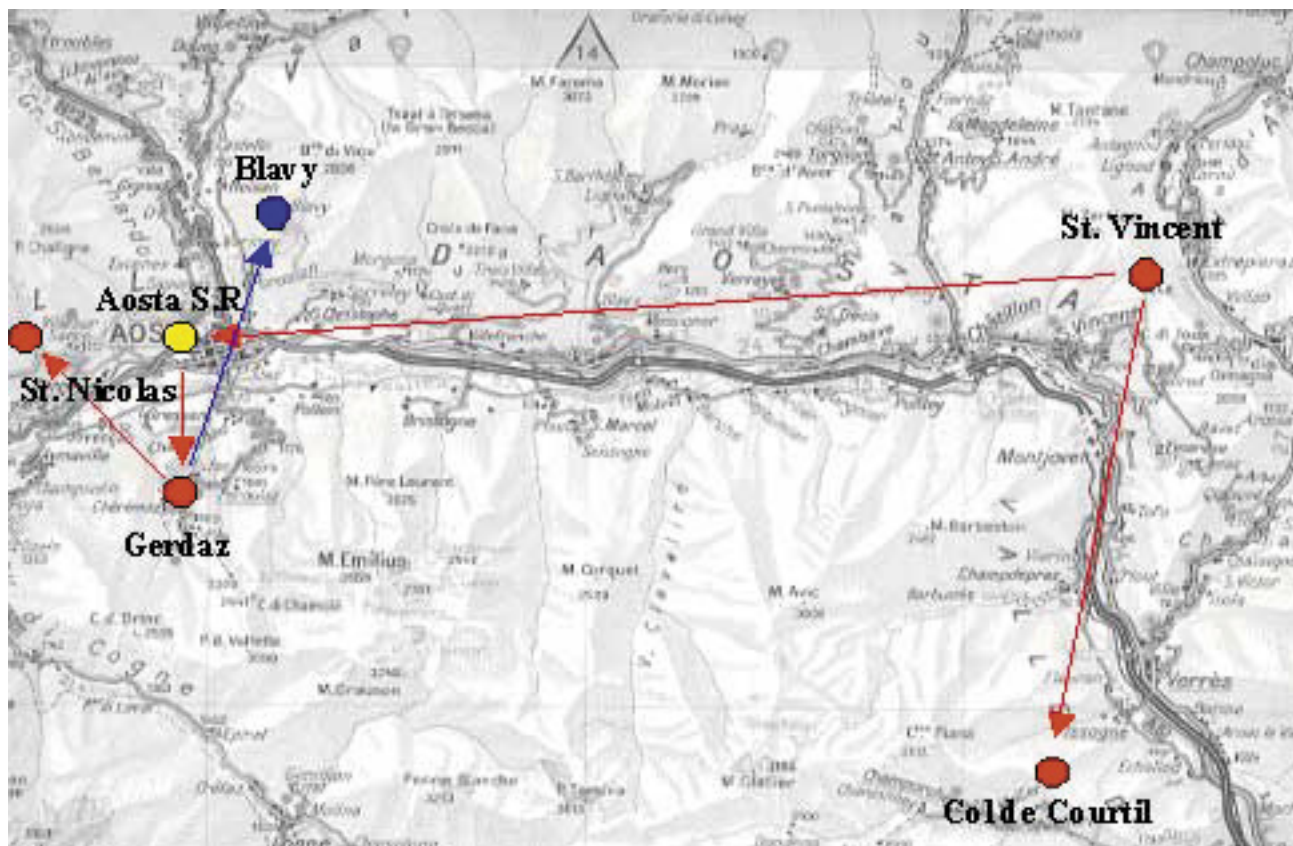



Fig. 10 - Configurazione della rete SFN DVB-T della Valle d'Aosta

4.1 Configurazione della rete SFN

La realizzazione della rete SFN viene aggiornata in fasi successive, sia per quanto riguarda l'attivazione dei trasmettitori che la modalità di trasporto del segnale ai trasmettitori.

Ad oggi, i centri trasmittenti di Gerdaz e St. Vincent sono già stati allestiti con trasmettitori DVB-T e sono operativi su carico artificiale, in attesa della concessione ministeriale all'irradiazione.

4.1.1 Trasporto tramite ponte radio analogico

Il multiplex DVB-T di banda base viene generato presso il Centro Trasmittente di St. Vincent utilizzando i programmi dei bouquet Rai diffusi da satellite e, dopo la modulazione OFDM, raggiunge l'impianto di Gerdaz per mezzo di un collegamento in ponte radio analogico normalmente utilizzato per il trasferimento dei segnali televisivi PAL. Per la compatibilità con gli ingressi dei ponti radio il segnale OFDM è trasferito dalla frequenza intermedia di uscita del modulatore (36,15 MHz) in una "banda base" compresa fra 0 e 10 MHz. Questa modalità di trasporto ha il duplice vantaggio di utilizzare un solo modulatore OFDM per tutta la rete SFN e di non richiedere grandi modifiche alla rete di distribuzione già esistente. Comporta però un degrado delle prestazioni del segnale DVB-T in termini di peggioramento del rapporto C/N, dovuto al fenomeno del rumore triangolare tipico della modulazione di frequenza, che si manifesta in modo più sensibile nella parte alta dello spettro OFDM Sul collegamento St. Vincent- Blavy è stato misurato un degradamento di circa di 0,1 dB [11]. A questo degrado, sebbene molto contenuto, potrebbe sommarsene uno ulteriore dovuto alle variazioni della propagazione (fading, effetti stagionali), che la attuale

configurazione di rete non equipaggiata con diversity di spazio/frequenza non consente di superare.

Altro aspetto di importanza non secondaria per una rete SFN connesso alla distribuzione del segnale mediante ponte radio analogico è quello della sincronizzazione temporale del segnale irradiato dai diversi trasmettitori che richiede un'opportuna compensazione dei ritardi di percorso. In una rete SFN l'area di servizio può essere in alcuni casi ottimizzata agendo sui ritardi relativi dei vari trasmettitori; tale operazione, nel caso di trasporto del segnale in formato analogico, può richiedere la conversione A/D del segnale di banda base e l'impiego di opportune linee di ritardo digitali.

4.1.2 Trasporto tramite ponte digitale e SFN adapter

Un sistema di distribuzione che non introduce degrado sul segnale OFDM, in termini di peggioramento dell'S/N, e nello stesso tempo risolve i problemi di sincronizzazione temporale dei trasmettitori, è quello basato sulla trasmissione del Transport Stream (TS) relativo al multiplex DVB-T su collegamenti digitali su ponte radio o su fibra ottica. Questa tecnica di trasporto richiede, a differenza della distribuzione analogica, che il segnale sia successivamente modulato OFDM presso ogni centro trasmittente. Per ottenere la sincronizzazione degli impianti trasmittenti, la specifica DVB/ETSI [12] utilizza dei blocchi di dati (MIP, Mega-frame Initialization Packet) inseriti nel TS mediante apparati "SFN adapter", recanti tutte le informazioni necessarie per ottenere la corretta sincronizzazione dei trasmettitori. La possibile conversione dell'attuale rete di distribuzione in ponte radio analogico impiegata nella sperimentazione DVB-T in Valle d'Aosta è allo studio da parte di Rai-CRIT e RaiWay, e utilizzerà le infrastrutture della attuale rete di distribuzione digitale SDH in ponte radio gestita da RaiWay.

Per quanto riguarda il multiplex DVB-T, si può ipotizzarne la generazione presso il Centro Trasmittente di St. Vincent, che opera come impianto capo-rete; in alternativa si valuta l'opportunità di generarlo presso il Centro Servizi di Rai-CRIT e Torino e trasportarlo sulla rete DVB-T della Valle d'Aosta attraverso un collegamento SDH. Ciò consentirebbe di estendere la sperimentazione DVB-T pre-operativa ad una vasta area geografica con un "bouquet di programmi" arricchito nei contenuti con nuovi servizi quali EPG, MHP etc., già disponibili presso Rai-CRIT.

5. Conclusioni

La televisione terrestre, dopo la televisione via satellite e via cavo, sta per passare anche nel nostro Paese dalla attuale soluzione analogica PAL a quella digitale, secondo lo standard DVB-T. Questa radicale conversione tecnologica potenzierà ulteriormente il servizio televisivo orientato al grande pubblico in termini quantitativi e qualitativi, rendendo disponibile una grande offerta di programmi televisivi, radiofonici e multimediali, offrendo inoltre nuove prospettive di mercato ai fornitori di servizio, ai gestori di rete, all'industria del settore.

Le principali caratteristiche delle reti di diffusione televisiva terrestre sono la copertura capillare del territorio e la possibilità di introdurre servizi a carattere regionale e locale. La disponibilità dei risultati di sperimentazioni in aree pilota inserite nella realtà della attuale diffusione televisiva analogica, per impianti singoli e in prospettiva per reti a singola frequenza

(SFN), risulta quindi essenziale per affrontare la futura progressiva digitalizzazione della rete diffusiva.

Nell'articolo sono riportati i principali risultati della sperimentazione di televisione digitale terrestre (DVB-T) condotta nell'area pilota di Torino; è stata inoltre presentata l'architettura della rete DVB-T in Valle d'Aosta che costituirà prossimamente una nuova area di sperimentazione.

La sperimentazione DVB-T di Torino, che costituisce un contributo all'attività condotta dall'Autorità per le Garanzie nelle Comunicazioni e dal Ministero per le Comunicazioni, ha permesso di stimare la copertura della rete DVB-T, sulla base dei parametri tecnici adottati (ERP dei trasmettitori, frequenza del canale r.f, modulazione 64 QAM e/o 16 QAM, bit-rate., ecc.), di affrontare i problemi tecnici relativi al nuovo sistema (inter-operabilità tra apparati e certificazione delle loro caratteristiche, metodi di misura, previsioni campo,..) e di valutarne le prestazioni del servizio nei casi di ricezione fissa, con sistemi riceventi individuali, e mobile.

I risultati delle misure effettuate in area confermano sostanzialmente le prestazioni del sistema conosciute per via teorica e forniscono importanti elementi per la pianificazione sul territorio dei nuovi servizi DVB-T.

6. Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Dott. M. Cominetti per i suggerimenti alla stesura dell'articolo ed i colleghi A. Bertella, S. Berto, A. Gallo, D. Milanesio, S. Meneghello, R. Olivazzo, G.P. Placidi, B. Sacco, M. Tabone per i loro contributi alla sperimentazione.

Bibliografia

1. ETSI: Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, EN 300 744 V1.4.1, 01/2001.
2. M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: Prospettive per l'introduzione della televisione digitale terrestre in Italia, Elettronica e Telecomunicazioni, N° 3, dicembre 1999.
3. M. Cominetti, A. Morello, R. Serafini: Current plans for DTT implementation in a densely utilised frequency spectrum, Montreux TV Symposium, June 1999.
4. A. Bertella, M. Cominetti, S. Ripamonti, M. Visintin: The RAI DVB-T pilot trials in Turin, IBC 2000; Amsterdam; September 2000.
5. A.Bertella;B.Sacco;M.Tabone: Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
6. CEPT/FM-PT24(01) Doc. 047 Rev.4, September 2001.
7. CEPT: The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T), Chester, July 1997.
8. P.B. Forni: A GIS Based Flexible Environment for the Coverage Prediction and Evaluation of SFN; XXV URSI General Assembly, Lille, Sept. 1996
9. S. Meneghello, R. Olivazzo, V. Sardella: Misure in ricezione mobile nell'area di servizio del trasmettitore DVB-T di Torino Eremo (can. 28–UHF), Relazione Tecnica Rai-CRIT N° 99/24, agosto 1999.
10. Bertella, B.P.Forni, G.Giancane, B.Sacco, M.Tabone: Ricezione indoor di segnali DVB-T; Elettronica e Telecomunicazioni, di prossima pubblicazione.
11. Bertella, S. Berto, S. Mina, M. Tabone: DVB-T: test sul collegamento in ponte radio analogico St. Vincent-Gerdaz, Relazione Tecnica Rai-CRIT N° 99/13, marzo 1999.
12. ETSI: Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frency Network (SFN) syncronisation, TS 101 191 V1.3.1, January 2001.

Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T

ing. Andrea **Bertella**,
ing. Bruno **Sacco**,
p.i Mirto **Tabone**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

L' introduzione della televisione digitale terrestre (DVB-T) in vari Paesi europei rappresenta un importante passo verso la conversione globale del sistema radiotelevisivo alla tecnologia digitale. Il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), in collaborazione con RayWay, già dalla seconda metà degli anni '90 ha intrapreso una vasta attività di studio e sperimentazione tecnica [1],[2],[3],[4], nel contesto nazionale ed internazionale, contribuendo direttamente alla definizione della normativa [5].

In questo contesto, nell'ambito del progetto europeo ACTS-VALIDATE, presso i laboratori Rai-CRIT di Torino è stata installata una catena completa di trasmissione-ricezione DVB-T sulla quale sono state effettuate specifiche valutazioni tecniche allo scopo di verificare le effettive prestazioni del sistema e confrontarle con i dati teorici. La catena comprende i codificatori MPEG-2 (per tre programmi TV), un multiplatore DVB-TS (Transport Stream), il modulatore COFDM operante secondo le principali configurazioni di trasmissione previste dalla specifica, un trasmettitore da 50W operante in UHF sul canale 28, o sul canale 43, ed un ricevitore semiprofessionale.

Le prestazioni del sistema sono state valutate in entrambi i modi 2k e 8k, previsti dalla normativa, in presenza di vari degradamenti tipici del canale di diffusione terrestre, quali: rumore gaussiano bianco (AWGN), rumore impulsivo, echi statici (singoli e multipli) soggetti anche

Sommario

La televisione digitale terrestre (DVB-T), già introdotta in Gran Bretagna e in altri paesi europei, è in fase di avanzata sperimentazione nel nostro Paese. Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), nell'ambito del progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e dei progetti europei RACE-dTTb e ACTS-VALIDATE, ha contribuito direttamente alla definizione e alla validazione del sistema DVB-T. Il sistema, che impiega la modulazione multiportante COFDM, con numerose possibilità di configurare i parametri di trasmissione e la codifica di canale, permette la ricezione fissa, portatile e mobile. Sono possibili due modi operativi a seconda del numero di portanti all'interno del canale a radiofrequenza: il primo, con 2k portanti FFT, è destinato all'impiego su reti di diffusione convenzionali multi frequenza (MFN), ed è particolarmente adatto ai servizi per terminali mobili; il secondo con 8k portanti è adatto anche all'impiego su reti a singola frequenza (SFN) permettendo lo sfruttamento ottimale delle risorse in frequenza.

L'articolo presenta i risultati delle prove di laboratorio effettuate da Rai-CRIT e da altri Partner europei in ambito al progetto ACTS-VALIDATE. Tali prove hanno permesso di valutare la robustezza del sistema DVB-T in presenza dei tipici degradamenti introdotti dal canale trasmissivo nelle bande VHF/UHF e dal ricevitore d'utente: rumore (gaussiano e impulsivo), echi, distorsioni non lineari, effetto Doppler, interferenza cocanale generata da altri segnali DVB-T e/o da segnali TV analogici, rumore di fase del sintonizzatore, ecc. Nell'articolo vengono riportati i risultati delle valutazioni di laboratorio confrontandoli con le prestazioni teoriche del sistema.

ad effetto Doppler, distorsioni non lineari (introdotte ad esempio da amplificatori delle reti di distribuzione condominiale in cavo), valutando nei vari casi il margine del sistema per una corretta ricezione. Infine si sono determinati i rapporti di protezione, per alcuni tipiche configurazioni operative, in presenza di interferenti co-canale dovuti sia ad altri segnali digitali DVB-T che a segnali analogici PAL, ciò al fine di pianificare l'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali nell'attuale contesto analogico.

Le valutazioni hanno permesso inoltre di analizzare alcuni aspetti inesplorati della modulazione COFDM, come ad esempio la sensibilità al rumore di fase del sintonizzatore/ricevitore – particolarmente critica nel modo 8k –, il degradamento dovuto ad echi lunghi e profondi – prossimi o addirittura superiori all'intervallo di guardia del sistema – e la possibilità di operare con ricevitori portatili o mobili, normalmente dotati di semplice antenna ricevente omnidirezionale.

I risultati riportati nel seguito [Nota 1], sono stati adottati da VALIDATE come prestazioni di riferimento dello standard DVB-T. Per informazioni generali sullo standard DVB-T si rimanda alla bibliografia [4], [5].

Nota 1 - Per un rapporto completo sui risultati delle misure di laboratorio si rimanda alla [1]

2. Procedimento di misura

La valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema è stata condotta introducendo sul segnale DVB-T i tipici degradamenti imputabili al canale trasmissivo (rumore casuale e impulsivo, interferenze, echi multipli, rumore di fase, off-set di frequenza, non linearità, ecc.) e misurando nei vari casi il tasso di errore (BER) sul segnale ricevuto, dopo il primo livello di correzione degli errori di trasmissione effettuato nel ricevitore mediante decodifica di Viterbi.

L'effetto dei vari degradamenti si traduce in un aumento del rapporto portante/rumore DC/N [dB], rispetto al canale ideale, necessario per ottenere una ricezione del segnale audio-video sostanzialmente priva di errori. Questa condizione di Quasi Error Free (QEF) si raggiunge ad un tasso di errore (BER) di 2×10^{-4} (dopo decodifica di Viterbi), a cui corrisponde sul segnale audio-video – a valle del secondo livello di correzione degli errori tramite decodifica di Reed Solomon – un tasso d'errore inferiore a 10-11. I valori di C/N per il canale ideale (affetto solo da rumore gaussiano bianco e in assenza di distorsioni) assunti dalla CEPT [6] per gli schemi di modulazione presi in esame durante le misure di laboratorio sono:

QPSK ½ => 3.1 dB;
16 QAM ¾=> 12.5 dB;
64QAM 2/3=> 16.5 dB.

L'entità del degradamento viene correntemente espressa dal Noise Margin Loss (NML) che corrisponde all'aumento del rapporto portante/rumore ΔC/N rispetto al canale ideale necessario per raggiungere la condizione di corretta ricezione.

La figura 1 mostra uno schema semplificato del banco di misura allestito in laboratorio per realizzare l'intera catena, dalla sorgente al ricevitore; la catena consente di operare sia a frequenza intermedia (IF; 35,5 MHz) che a radio frequenza (canali UHF 28 e 43).

Per ciascun tipo di degradamento è stato utilizzato il seguente procedimento di misura:

a) in assenza di degradamento aggiuntivo, si aumenta il livello del rumore AWGN fino al raggiungimento della condizione QEF e si annota il valore corrispondente

di C/N all'ingresso del ricevitore (misurato nella banda di 7,6 MHz occupata dal segnale DVB-T entro il canale UHF da 8 MHz);

b) si introduce quindi il degradamento e si riduce progressivamente il livello di rumore fino a ritrovare la condizione QEF. A ciò corrisponde un aumento DC/N (dB) che identifica il Noise Margin Loss (NML) del sistema per il tipo di degradamento in esame.

2.1. Perdite d'implementazione

Le prestazioni dell'intera catena DVB-T, anche in assenza di degradamenti aggiuntivi, sono inevitabilmente inferiori rispetto al caso ideale a causa delle prestazioni dei vari apparati; ciò si riflette in un aumento del rapporto C/N alla soglia di corretta ricezione.

Una prima valutazione ha quindi riguardato la misura del degradamento ΔC/N, dovuto ai vari elementi costituenti la catena DVB-T, rispetto alla catena ideale simulata al calcolatore [4]. I degradamenti misurati si riferiscono separatamente al processo di mo-demodulazione a frequenza intermedia (IF-IF), al degradamento imputabile al sintonizzatore del ricevitore (IF-RF), e a quello globale introdotto dall'intera catena di trasmissione a radiofrequenza (RF-RF). Gli apparati inclusi nei tre collegamenti IF-IF, IF-RF e RF-RF sono evidenziati in figura 1.

I risultati sono riportati nella tabella 1 per alcune tipiche configurazioni di servizio (QPSK-1/2; 16QAM-3/4; 64QAM-2/3) e per alcuni valori dell'intervallo di guardia Δ della modulazione multiportante COFDM. I parametri 1/2, 3/4 e 2/3 associati a QPSK, 16QAM e 64QAM si riferiscono al code-rate del codice correttore convoluzionale impiegato nello standard (il rapporto 2/3 individua 2 bit utili + 1 bit di protezione).

Dai risultati delle misure si possono trarre

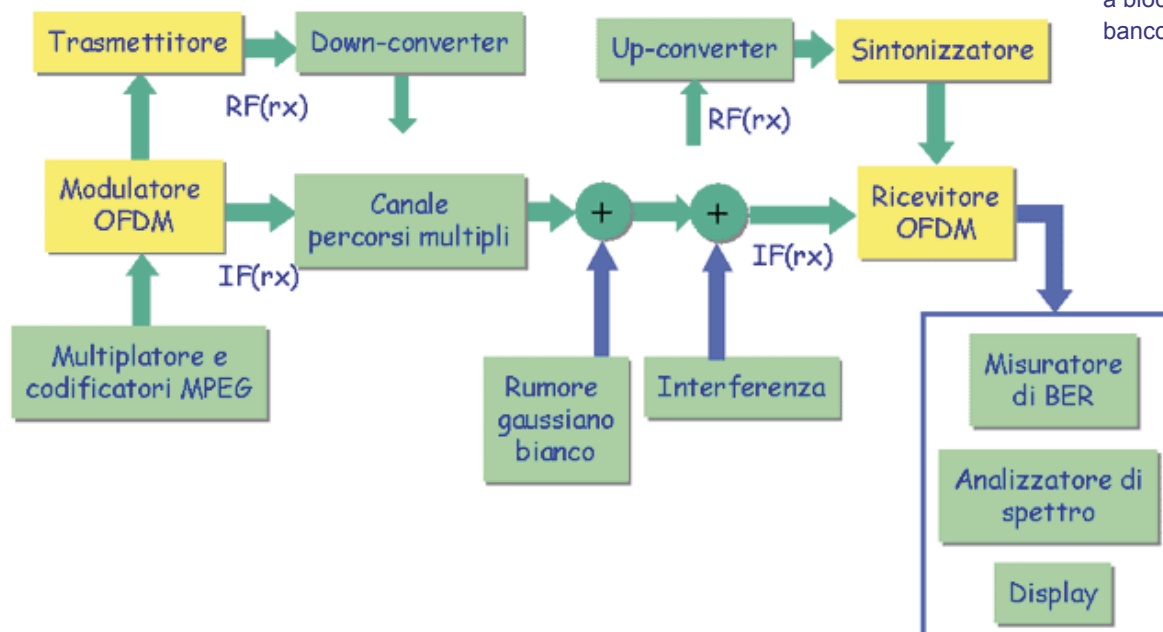



Fig. 1 - Schema a blocchi del banco di misura

Tabella 1. Perdite di implementazione ΔC/N [dB] rispetto al canale ideale

			ΔC/N [dB]				
Configurazione delle connessioni in laboratorio			IF(tx)-IF(rx)	IF(tx)-RF(rx)		RF(tx)-RF(rx) Nota	
Modulazione e codifica	Δ	FFT	Degradamento modem base	Degradamento sintonizzatore		Degradamento totale	
				ch. 28	ch. 43	ch. 28	ch. 43
QPSK 1/2	1/8	2k	1.7	0.0		1.7	1.8
		8k	1.6	0.0		1.8	1.8
16QAM 3/4	1/32	2k	1.6	0.0		1.7	1.7
		8k	1.5	0.1		1.7	1.7
64QAM 2/3	1/4	2k	2.4	0.2	0.5	2.8	3.1
		8k	2.3	0.3	0.7	2.9	3.3

Nota: Il degradamento del rapporto C/N del sistema imputabile al trasmettitore dipende dalla configurazione di trasmissione adottata (codifica di canale e modulazione) e dalle distorsioni non lineari introdotte dall'amplificatore di potenza. Nella configurazione in esame si è misurato un degradamento compreso tra 0,1 e 0,3 dB.

Tab.1 - Perdite di implementazione ΔC/N [dB] rispetto al canale ideale

le seguenti conclusioni:

- Comportamento del ricevitore (BER dopo Viterbi):
  BER < 10^{-2} : sincronizzazione affidabile, ma qualità video inaccettabile
  BER= 10^{-3} : qualità video discreta
  BER=$2 \cdot 10^{-4}$: qualità video buona
- Perdita di implementazioe DC/N in connessione IF-IF:
  QPSK 1/2 e 16QAM 3/4: circa 1,6 dB, vicino al valore teorico per stima di canale 2D [4].
  64QAM 2/3: circa 2.4 dB, 0.8 dB peggiore del valore teorico
  per stima di canale 2D [4].
- Degradamento di 0.2 ¸ 0.7 dB dovuto al rumore di fase del tuner in funzione del canale RF (28 e 43).
- Le prestazioni nei modi 2k e 8k sono sostanzialmente comparabili.
- Le perdite d'implementazione complessive misurate sulla catena RF-RF sono risultate pari a circa 2 dB per QPSK 1/2 e 16QAM 3/4 (2.5 dB con Δ = 1/4) e di 3 dB per 64QAM 2/3.

2.2. Prestazioni in presenza di echi statici

Una importante caratteristica del sistema DVB-T, dovuta alle prestazioni intrinseche della modulazione COFDM, è la possibilità di operare su un canale R.F. soggetto ad echi statici profondi, sia naturali (prodotti da riflessioni del terreno o da vari ostacoli), sia artificiali, dovuti ai segnali dei vari trasmettitori di una rete isofrequenziale (SFN). Ciò consente potenzialmente di estendere il servizio anche alla ricezione del segnale con apparecchi portatili dotati di antenna omnidirezionale incorporata

("baffo") che, non essendo direttiva, non offre alcuna reiezione nei confronti degli echi. E' questo sicuramente un importante valore aggiunto dello standard digitale DVB-T nei confronti della televisione analogica.

Eco singolo

Le prove sono state effettuate sul canale 28 UHF, in connessione IF(tx)-RF(rx), in presenza di un singolo eco con valori di ritardo inferiori e superiori all'intervallo di guardia Δ adottato.

La figura 2 mostra l'andamento di NML relativamente alla configurazione 64QAM rate 2/3 nel modo 8k, in funzione del ritardo e dell'ampiezza dell'eco. Il parametro (C/I) indica in dB il rapporto fra la potenza del segnale principale (C) e quella dell'eco interferente (I). L'intervallo di guardia Δ=1/4, scelto nelle misure, a cui corrisponde una durata t_g = 224 µs, è tipicamente adottato nelle reti SFN.

Come si evince dalla figura 2 i risultati per il modo 2k sono simili, previo un opportuno scalamento nel ritardo dell'eco del fattore 2k/8k=0,25.

Dai risultati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I valori di NML misurati confermano sostanzialmente i risultati delle simulazioni al calcolatore [4].
- L'impiego di bassi code-rate (1/2 o 2/3) per il codice correttore convoluzionale aumenta la robustezza del sistema contro gli echi.
- Echi molto forti, aventi addirittura la stessa ampiezza del segnale principale (C/I=0 dB) ma con ritar-

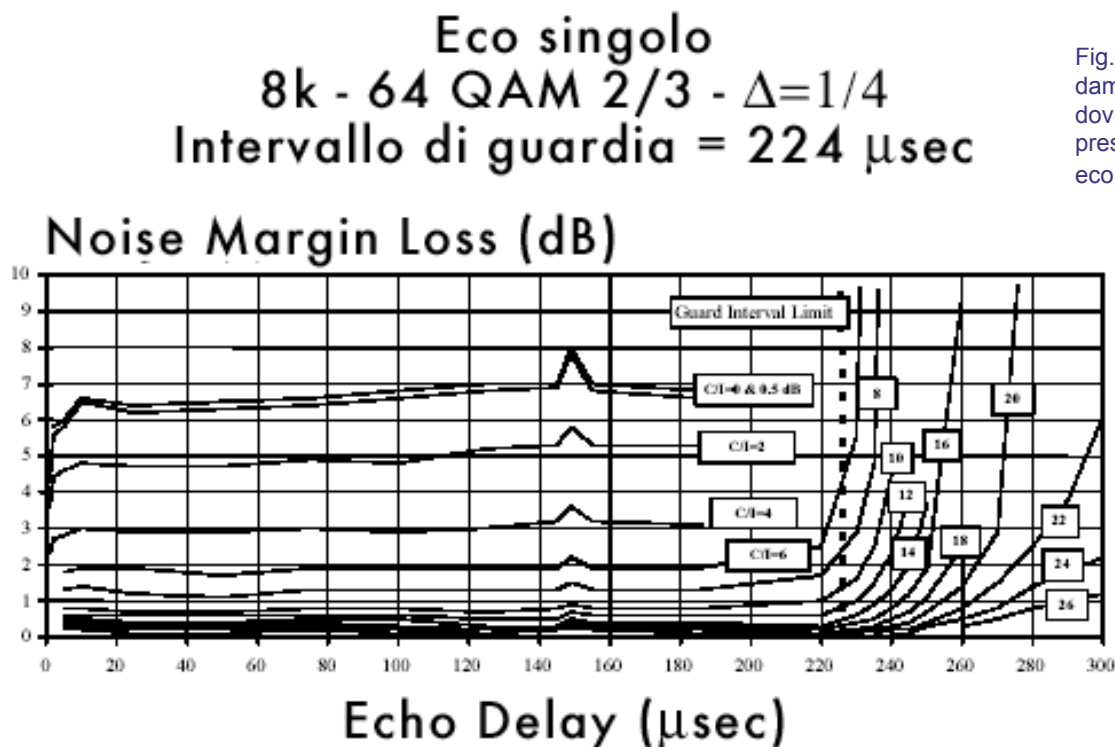



Fig. 2 - Degradamento (NML) dovuto alla presenza di un eco singolo

do contenuto entro l'intervallo di guardia, pur degradando le prestazioni del sistema non compromettono la ricezione in quanto il degradamento è parzialmente recuperato grazie al contributo in potenza sul segnale ricevuto dovuto agli echi medesimi. Si è misurato un NML compreso tra 4 e 9 dB, a seconda del code rate e del ritardo dell'eco.

Echi multipli

Nota 2 - E' una tipica rete SFN che include molti piccoli trasmettitori su un'area limitata

Sono stati considerati quattro profili di echi statici, indicati rispettivamente come "fixed", "portable", "dense SFN" Nota 2 e "regional SFN"; essi caratterizzano tipiche condizioni di ricezione riscontrabili in area di servizio a seconda anche della tipologia di rete.

I primi due casi "fixed" e "portable", definiti in dettaglio nell'Annex B della specifica DVB-T [5], rappresentano rispettivamente le condizioni di ricezione fissa con antenna direttiva (distribuzione di Rice) e di ricezione portatile con antenna omnidirezionale (distribuzione di Rayleigh). Per ciò che riguarda gli altri due casi, si è adottata la seguente configurazione degli echi (τ=ritardo in µs, γ=C/I in dB):

Dense SFN:
raggio 1: τ=0, γ=0;
raggio 2: τ=7.8, γ=9.3;
raggio 3: τ=11.6, γ=5.5;
raggio 4: τ=17.5, γ=16.1;
raggio 5: τ=20, γ=14.5 ;
raggio 6: τ=23.4, γ=23.4;

Regional SFN:
raggio 1: τ=0, γ=0;
raggio 2: τ=Δ/3, γ=9.3;
raggio 3: τ=Δ/2, γ=5.5;
raggio 4: τ=7Δ/10, γ=16.1;
raggio 5: τ= 4Δ/5, γ=14.5 ;
raggio 6: τ= 9D/10, γ=23.4.

La tabella 2 riporta i risultati delle misure che non si scostano sensibilmente da quelli ottenuti mediante le simulazioni al

Tab. 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

Tabella 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

Condizioni di ricezione	Noise margin losses $\Delta C/N$ [dB] (Rifermento: AWGN prestazioni di canale)					
	QPSK 1/2 Δ=1/8		16QAM 3/4 Δ=1/32		64QAM 2/3 Δ=1/8	
	2k	8k	2k	8k	2k	8k
Fisso (Rice, antenna direttiva)	0.4 (0.5*)	0.4 (0.5*)	0.8 (0.5*)	0.6 (0.5*)	0.7 (0.6*)	0.5 (0.6*)
Portatile (Rayleigh, antenna omnidirezionale)	2.5 (2.3*)	2.6 (2.3*)	4.3 (4.2*)	4.4 (4.2*)	3.4 (2.8*)	3.5 (2.8*)
SFN densa (Rayleigh)	2.1	2.2	(**)	3.5	2.6	2.8
SFN regionale (Rayleigh)	2.1	2.2	3.4	3.4	2.5	2.8

(*) : simulazioni al calcolatore
(**): non valutabile (presenza nel profilo di canale di un eco oltre l'intervallo di guardia)

calcolatore, indicati fra parentesi.

Il degradamento ΔC/N riscontrato su canale Rice – che è tipico della ricezione fissa con antenna direttiva (raggio principale di 10 dB superiore agli echi) – raggiunge gli 0,8 dB. Su canale Rayleigh, affetto da propagazione multipercorso con nessun raggio dominante – condizione tipica della ricezione con terminale portatile equipaggiato con antenna omnidirezionale – il degradamento è significativamente inferiore a quello dovuto ad un eco singolo a 0 dB, come si vede dalla figura 2.

2.3. Prestazioni in presenza di echi affetti da Doppler-shift

Benché il sistema DVB-T sia stato sviluppato inizialmente per la ricezione fissa, si possono presentare casi in cui, a causa del movimento di oggetti riflettenti attorno all'antenna ricevente (specialmente per ricevitori portatili con antenna omnidirezionale), la risposta in frequenza del canale subisca lente variazioni che possono degradare le prestazioni del sistema, in particolare nel modo 8k dove si ha la minor durata del simbolo COFDM rispetto al modo 2k.

Nel modo 2k – tipicamente impiegato nelle reti MFN – impiegando modulazioni e code rate robusti (ad esempio QPSK-1/2, 16QAM-1/2) è possibile anche la ricezione mobile[Nota 3] [3], anche se la specifica del sistema non include il time interleaving – impiegato nel DAB [7] – che consente di assorbire le fluttuazioni a breve termine del segnale.

Si sono pertanto valutate le prestazioni del sistema in presenza di echi singoli e multipli affetti da Doppler shift, che simula la condizione di fluttuazione del segnale suddetto. Nel caso più semplice di due soli raggi la risposta del canale è caratterizzata da "buchi" in frequenza che si spostano nel tempo a velocità costante generando variazioni di ampiezza e fase della costellazione di ciascuna portante COFDM. In presenza di più raggi la risposta in frequenza e la sua evoluzione si complicano ulteriormente.

Le misure sono state effettuate sul canale 28 – UHF in due tipiche configurazioni caratterizzate da differenti profili di echi con ritardi inferiori all'intervallo di guardia:

Eco singolo:

- Ritardo 0.9Tg;
- Doppler: τ=0 (raggio principale), $2f_d$;
- Attenuazione dell'eco: 0, 3, 5 e 10 dB;

Echi multipli:

- Ritardi: t=0 (raggio principale), $T_g/4$, $T_g/3$, $2T_g/3$;
- Doppler: $+f_d$, $-f_d$, $+f_d$, $-f_d$;
- Attenuazione di ogni singolo eco rispetto al raggio principale di 0, 8.77 dB (C_m/SI_e = 4 dB) e 14.77 dB (C_m/SI_e =10 dB).

Con riferimento alla tabella 3, per le tre configurazioni considerate si è determinato il massimo valore del Doppler shift f_d (picco-picco) in Hz tale da introdurre un degradamento NML di 4 dB rispetto al canale con il medesimo profilo di echi ma statici. Poiché, il NML in funzione di f_d degrada molto rapidamente, la scelta del NML= 4 dB come riferimento non è critica ai fini dei risultati ottenuti.

La tabella 3 riporta i principali risultati. Le prestazioni con eco singolo e con echi multipli sono comparabili; come previsto, la configurazione 2k, grazie alla minore durata del simbolo, consente una velocità di equalizzazione delle variazioni del canale circa quattro volte più elevata di quella dell'8k; pertanto il modo 2k offre

Nota 3 - Nel modo 2k la durata del simbolo COFDM è ¼ rispetto al modo 8k; pertanto le variazioni della risposta del canale all'interno della durata del simbolo – ed il relativo degradamento – sono inferiori rispetto al modo 8k e tipicamente dell'ordine di ¼.

Tabella 3. Massimo Doppler shift (fd) per un NML=4 dB

Modulazione e code rate	Modo	Doppler shift f_d [Hz]					
		Eco singolo			Echi multipli		
		$C_m/I_e=0$	$C_m/I_e=3$	$C_m/I_e=10$	$C_m/\Sigma I_e=0$	$C_m/\Sigma I_e=4$	$C_m/\Sigma I_e=10$
QPSK-1/2	2k	150	160	>210	115	280 (*)	>425
(Δ=1/8)	8k	24	50	>210	27	70 (*)	>425
16QAM-3/4	2k	23	58	165	37	80	155
(Δ=1/32)	8k	5	15	40	10	19	45
64QAM-2/3	2k, Δ=1/4	14	19	95	15	28	100
	8k, Δ=1/8	4	8	23	4	8.5	21

(*): sul canale 28 UHF corrisponde a una velocità pari
280 Hz => 137 km/h   70 Hz => 34 km/h

Tab. 3 - Massimo Doppler Shift (fd) per un NML = 4 dB

prestazioni notevolmente superiori al modo 8k in ricezione mobile.

Il massimo Doppler shift f_d accettabile dipende fortemente dal livello degli echi. In presenza di echi molto forti (C/I= 0 dB) il modo QPSK-1/2 (2k) può reggere Doppler shift di oltre 100Hz, rendendo quindi possibile la ricezione mobile con un bit rate utile limitato però a circa 6 Mbps. Il modo 64QAM-2/3 (8k) può invece inseguire solo variazioni lente del canale (pochi Hertz) risultando pertanto essenzialmente adatto alla ricezione fissa, con un bit rate utile di circa 24 Mbps.

Prove successive hanno dimostrato la possibilità di impiegare in ricezione mobile anche il 16QAM- ½, che rende disponibile un bit rate utile di circa 12 Mbps.

2.4. Degradamento dovuto al rumore impulsivo

La presenza di rumore impulsivo si può riscontrare in prossimità di linee ad alta tensione, ferrovie, impianti industriali, ecc. e può altresì verificarsi in ambito domestico a causa degli elettrodomestici (frigoriferi, forni a microonde, rasoi elettrici ecc.). E' importante valutare il possibile degradamento introdotto sulla qualità di ricezione del segnale digitale.

Il rumore impulsivo è stato simulato per mezzo di un generatore di impulsi filtrato con un filtro SAW centrato alla frequenza intermedia (IF) del canale; la frequenza di ripetizione dell'impulso (PRF) è stata variata fra 50 Hz e 20 kHz.

Le misure sono state effettuate rilevando il rapporto segnale-interferente C/I_o a cui corrisponde un degradamento (NML o ΔC/N) di 1 dB, 3 dB e ∞ dB, per un

BER=$2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi. I_o è la potenza media del rumore impulsivo filtrato e normalizzato rispetto al PRF in modo tale che, mantenendo I_o costante, l'ampiezza dell'impulso risulta indipendente da PRF.

La figura 3 mostra i risultati più significativi relativi alla configurazione 64 QAM rate 2/3, modo 8K.

L'andamento delle curve può essere così interpretato:

Per valori di PRF che introducono una ripetizione temporale del disturbo impulsivo sul simbolo COFDM inferiori a circa 890 Hz solo un simbolo ogni N risulta danneggiato dall'interferente, dove N= symbolrate/PRF. Di conseguenza il BER medio è proporzionale al PRF. L'andamento del C/I_0 in funzione del BER risulta all'incirca piatto (circa 1 dB / decade di BER), e quindi la pendenza che ne deriva è trascurabile. Pertanto la condizione di ricezione è critica essendo possibile passare rapidamente da una ricezione corretta all'interruzione del servizio allorchè il livello del disturbo impulsivo aumenta anche solo di qualche dB (C/I_0 intorno ai 40 dB).

Per PRF superiori alla durata del simbolo COFDM, ossia per frequenze superiori a 890 Hz, ci sono M impulsi interferenti per ogni simbolo, e la potenza dell'interferente cresce in modo proporzionale al PRF. Di conseguenza la pendenza delle curve nella parte destra del grafico è di circa 10 dB per decade. Ciò significa che, per una corretta ricezione, il livello del disturbo impulsivo accettabile si riduce progressivamente al crescere della frequenza di ripetizione.

2.5. Disallineamento nella risposta in frequenza del canale

Sono state effettuate prove di laboratorio per valutare il degradamento (NML) dovuto ad alterazioni della risposta in frequenza, entro la banda di 7,6 MHz occupata dal segnale COFDM, con una pendenza

Fig. 3 - 64QAM-2/3: prestazioni con rumore impulsivo (modo 8k)

Tabella 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66			
Programma	Bit-rate (Mbps)		
	Video		Audio
RaiUno	2÷6 (VBR)	Multiplex statistico: 20 Mbps	0,192
RaiDue	2÷6 (VBR)		0,192
RaiTre	2÷6 (VBR)		0,192
RaiSport	2÷8 (VBR)		0,192
RaiEducational	2÷8 (VBR)		0,192
RaiNews24	2 (CBR)		0,192
Dati	1,5		

Tab. 4 - Tilt T [dB] per un dato noise margin loss ΔC/N [dB]

costante (tilt); questo tipo di disallineamento può essere introdotto dai convertitori e/o dagli amplificatori di canale degli impianti centralizzati d'antenna e/o dagli eventuali ripetitori DVB-T in banda (gap-filler) impiegati all'interno degli edifici. La valutazione delle prestazioni del sistema DVB-T con ricezione indoor, in particolare per quanto riguarda l'impiego di gap-filler, sarà oggetto di un prossimo articolo da pubblicare su questa rivista._

Allo scopo è stato simulato in laboratorio un tilt dello spettro di T [dB] (picco-picco), ottenuto introducendo un eco a 0 dB con ritardo di 50 ns (equivalente ad una periodicità dei buchi nello spettro di 1/50 ns = 20 MHz) e con fase tale da generare il tilt desiderato, con pendenza positiva o negativa (slope + o slope -). Si sono quindi ottenuti gli spettri indicati in figura 4.

La tabella 4 riporta i valori massimi del tilt T in dB che generano un degradamento NML (ossia Δ C/N) inferiore di 0.5 e 1 dB rispetto al canale ideale affetto solo da rumore bianco gaussiano. Le valutazioni sono state effettuate sul 64QAM (rate 2/3, Δ=1/4), nei due modi 2k e 8k.

I risultati delle misure mostrano che il valore di tilt sulla risposta in banda accettabile dipende fortemente dal tipo di pendenza (positiva o negativa). Nel caso peggiore (pendenza positiva), il massimo tilt tollerabile è risultato di 2,5-3 dB per un degradamento di 0.5 dB e di 4.5 ÷ 5 dB per un degradamento di 1 dB. Questi valori evidenziano l'importanza di assicurare una corretta risposta in frequenza dei componenti costituenti le reti di distribuzione condominiali (amplificatori, convertitori di canale, ecc.), oltre ad un buon adattamento di impedenza della rete di distribuzione in cavo attraverso una accurata messa a punto dell'impianto.

Per valutare l'ulteriore possibile degradamento imputabile al sistema di ricezione d'antenna dell'impianto condominiale, è stato applicato un disallineamento di questo tipo ad un segnale che simula la ricezione via etere affetta da echi tipici del canale Rice. Tale situazione si può verificare distribuendo attraverso l'impianto condominiale non perfettamente allineato il segnale ricevuto con antenna direttiva. I risultati delle misure si possono così sintetizzare: nel caso di disallineamento con pendenza positiva (caso peggiore) sono

Fig. 4 - Spettri affetti da Tilt con pendenza negativa e positiva

stati misurati valori simili di degradamento con gli stessi livelli di tilt delle prove precedenti. Al contrario, con pendenze negative (caso migliore), i valori di tilt più alti tollerabili su canale gaussiano (8-12 dB) non erano più applicabili e sono stati misurati valori simili a quanto trovato con tilt a pendenza positiva.

In conclusione, si può dire che il degradamento imputabile ad alterazioni lineari con andamento monotono della risposta in frequenza del canale RF può essere contenuto entro 0.5÷1 dB a condizione che il tilt dello spettro in banda sia inferiore a 3÷5 dB.

La maggior sensibilità alle distorsioni generate da disallineamenti nella risposta in frequenza con tilt a pendenza positiva riscontrata nelle prove è stata oggetto di ulteriori valutazioni di laboratorio che hanno consentito di imputare il comportamento asimmetrico alle prestazioni del ricevitore prototipale impiegato nella catena dTTb. Il ricevitore commerciale impiegato nelle successive prove di verifica ha presentato un comportamento simmetrico nei confronti della pendenza del tilt (slope + o slope -) la cui entità, per un degradamento DC/N= 0.5 dB e 1 dB, è risultata compresa tra 5 e 6.5 dB rispettivamente.

2.6. Prestazioni con interferenza co-canale

L'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali DVB-T richiede la conoscenza del massimo livello d'interferenza accettabile e provocato da altri segnali, sia analogici che digitali, irradiati sulla stessa frequenza (interferenza co-canale) o su canali adiacenti. Queste condizioni del servizio operativo sono individuate dai rapporti di protezione CCI e ACI. La conoscenza di questi valori, già adottati dall' ITU con l'introduzione della televisione terrestre analogica, è fondamentale per la pianificazione dei nuovi servizi televisivi digitali. I valori misurati in laboratorio e riportati nel seguito riguardano esclusivamente l'interferenza co-canale, mentre per informazioni più complete si rimanda al rapporto della CEPT [6].

Interferente digitale DVB-T su DVB-T

Il rapporto di protezione (PR) co-canale (CCI) è definito come:

"rapporto in potenza tra segnale utile e segnale interferente che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo (BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi)".

Si osservi che un sistema caratterizzato da un basso rapporto di protezione è in grado di accettare, senza degradamento di qualità, livelli d'interferenza elevati. La tabella 5 riporta i valori di CCI ottenuti sul

Tab. 5 - Valori di PR(CCI) [dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Tabella 5. Valori di PR(CCI)[dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Modulazione	Code rate	PR (CCI)
QPSK	1/2	4.8
16-QAM	3/4	14.3
64-QAM	2/3	19.3

Tabella 6. Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico

Segnale voluto	Segnale interferente	PR(CCI) [dB]											
		QPSK, r=1/2				16-QAM, r=3/4				64-QAM, r=2/3			
		8k		2k		8k		2k		8k		2k	
		L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
BBC(*)	PAL-I	ND	ND	-11	-9	ND	ND	-4	-0.5	ND	ND	-1.5	+1
DTTb	PAL-G	-2	+4	-3	+4	-2	+4	-2	+5	+2	+6	+3	+6
DTTb	Secam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-5	+5	+5	+8

(*)Misure effettuate con soglia "Failure point" (probabilmente tali misure danno dei rapporti di protezione lievemente più bassi rispetto a quanto ottenibile con la misura a $BER=2.10^{-4}$).

Tab. 6 - Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico

canale 28 UHF per tre differenti configurazioni di trasmissione, in modalità 2k e con intervallo di guardia Δ=1/4.

Il segnale interferente è stato ottenuto dal segnale utile ritardandolo di 360 ms –superiore cioè alla durata totale del simbolo COFDM di 280 ms al fine di riprodurre la condizione di ricezione più critica – ed introducendo progressivamente uno spostamento di frequenza Δf rispetto al centro del canale RF. Sono stati introdotti 17 valori di Δf all'interno del canale (fra -8 kKz e +8 kHz, a passi di 1 kHz), rilevando il valore peggiore del rapporto di protezione CCI che è stato riportato in tabella 5.

I risultati dimostrano, come prevedibile, che un interferente DVB-T ha effetti simili al rumore gaussiano avente medesimo livello di potenza nella banda del ricevitore.

Interferente da TV analogica su DVB-T

In ambito al Progetto RACE dTTb, BBC, CCETT e RAI hanno effettuato numerose prove di laboratorio per valutare i rapporti di protezione del segnale DVB-T interferito da segnale TV analogico negli standard impiegati in Gran Bretagna (PAL-I), Francia (L/SECAM) ed Italia (PAL-G, nelle bande IV e V).

Le misure sono state effettuate nelle seguenti condizioni:

- Segnale PAL-I, con audio FM non modulato e sottoportante audio digitale NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/32
- Segnale PAL-G, con audio FM modulato con tono ad 1 kHz e NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4
- Segnale L/SECAM, con audio AM non modulato e senza NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4

La tabella 6 riporta i risultati relativi ai rapporti di protezione co-canale CCI di segnali DVB-T interferiti da segnali TV analogici, modulati da un'immagine fissa (barre di colore EBU-75%). Nel caso dei segnali analogici a norma PAL il rapporto di protezione CCI è definito come:

"rapporto fra la potenza media del segnale DVB-T e la potenza del segnale PAL interferente, misurata al picco del sincronismo, che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo".

Il picco del sincronismo individua infatti il livello della portante r.f. non modulata a cui corrisponde la massima potenza del segnale irradiato.

I valori di CCI in Tabella 6 sono stati rilevati aumentando progressivamente il livello del segnale analogico interferente fino a raggiungere un BER pari a 2.10-4 dopo decodifica di Viterbi, tranne quando diversamente indicato. Si riscontra che i valori di CCI misurati presentano una periodicità corrispondente alla spaziatura delle portanti COFDM (4.4 kHz nel modo 2k e 1.1 kHz nel modo 8k). L'ampiezza di queste variazioni è indicata nella Tabella 6 dalle colonne "L" e "U", dove la colonna "L" riporta i valori migliori, mentre la colonna "U" quelli peggiori. In alcuni casi si è riscontrata una più marcata casualità dei risultati.

I valori di CCI misurati nei modi 2k e 8k non sono molti differenti, tranne per quanto riguarda il SECAM, dove la portante audio AM non era modulata e il segnale NICAM non era presente.

Si è osservato un degradamento molto significativo delle prestazioni quando la portante video analogica è vicino alle portanti pilota continue del segnale DVB-T [5]. Nel 64QAM, quando si verifica tale condizione, si riscontra un degradamento notevole. Tali valori non sono stati riportati in tabella 6. E' quindi molto importante evitare questa situazione giocando opportunamente, nella fase di messa a punto della catena trasmittente, sulla posizione dello spettro del segnale COFDM nel processo di conversione FI – RF rispetto alla portante video analogica del segnale co-canale RF interferente.

Benché la posizione dello spettro in frequenza del segnale DVB-T irradiato possa essere attentamente scelta in modo da limitare sensibilmente l'interferenza della portante video analogica con le portanti pilota "continue" del DVB-T, questo potrebbe costituire un vincolo stringente per la pianificazione dei nuovi servizi nel nostro Paese, in particolare nella situazione ibrida analogica PAL-digitale DVB-T che caratterizzerà la prima fase.

I valori di CCI ottenuti sul dimostratore dTTb hanno dimostrato una dipendenza dalla configurazione DVB-T adottata superiore a quanto ci si attendeva, probabilmente dovuta alle prestazioni del ricevitore prototipale. Questo vale in particolare per i valori di CCI relativi al 16QAM e al QPSK, che sono risultati superiori a quelli adottati dalla CEPT nella pianificazione dei servizi DVB-T e che hanno trovato successivamente conferma nelle migliori prestazioni dei ricevitori DVB-T rispetto al ricevitore prototipale impiegato nelle prove di laboratorio. I valori di CCI misurati sul 64 QAM-2/3 sono invece risultati molto vicini a quelli adottati dalla CEPT [6].

3. Conclusioni

L'articolo riporta i risultati delle valutazioni di laboratorio effettuati da Rai CRIT sul dimostratore DVB-T, realizzato secondo la specifica tecnica [5] nell'ambito del progetto RACE dTTb. Le misure hanno permesso di valutare la robustezza della modulazione COFDM, che rappresenta il cuore del sistema digitale terrestre europeo, in presenza delle tipiche distorsioni e interferenze che possono essere introdotte dal canale trasmissivo, come il rumore gaussiano e impulsivo, gli echi di diversa ampiezza e ritardo, l'effetto Doppler, l'interferenza generata da altri segnali DVB-T e da segnali TV analogici, il rumore di fase del tuner, ecc.

I valori dei degradamenti rispetto al caso di canale ideale misurati nelle varie condizioni, confermano sostanzialmente le previsioni delle simulazioni al calcolatore

e forniscono una valutazione globale delle prestazioni del sistema DVB-T.

Questi risultati, che hanno rappresentato un contributo della RAI al rapporto CEPT/EBU per la conferenza di Chester [6], forniscono utili elementi per la pianificazione dei nuovi servizi DVB-T, nello scenario ibrido digitale-analogico che caratterizza la fase di avvio, in termini di rapporto portante/rumore C/N e di rapporti di protezione co-canale da e verso i servizi televisivi analogici esistenti per le varie configurazioni di trasmissione previsti nella normativa.

Bibliografia

1. A.Morello, G.Blanchietti, C.Benzi, B.Sacco, M.Tabone: “Performance assessment of a DVB-T television system”, Rai-CRIT; Montreux TV Symposium, June 1997.
2. A.Bertella;M.Cominetti;S.Ripamonti;M.Visintin: “The RAI DVB-T pilot trials in Turin”, IBC 2000; Amsterdam; September 2000.
3. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: “Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio”; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
4. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin: “Il sistema europeo per la Televisione Digitale Terrestre”, Elettronica e Telecomunicazioni 1/2002.
5. ETSI: “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television”, EN 300744 - V1.4.1, January 2001.
6. CEPT: “The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)”, July 1997.
7. ETSI: “Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers”,

Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Michele **Visintin**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

In ambito al Progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e ai progetti europei RACE dTTb, ACTS VALIDATE e MOTIVATE, il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT) ha direttamente contribuito alla definizione e alla validazione del sistema per la diffusione televisiva digitale terrestre (DVB-T). Il sistema, che permette la ricezione fissa, portatile e mobile, è basato sulla modulazione multiportante COFDM, una soluzione tecnica avanzata che consente di configurare i parametri di trasmissione in modo flessibile per meglio adattarsi alle caratteristiche del canale di diffusione terrestre. Sono possibili due modalità operative: con 2K portanti per le reti di diffusione convenzionali multifrequenza (MFN), e con 8K portanti per operare anche su reti a singola frequenza (SFN). L'introduzione di reti SFN, non possibile nelle trasmissioni televisive analogiche, consente una utilizzazione ottimale dello spettro.

L'articolo presenta le caratteristiche principali del sistema DVB-T, con particolare attenzione alla modulazione COFDM, e ne illustra le prestazioni ottenute da Rai-CRIT mediante simulazioni al calcolatore.

1. Introduzione

Il rapido progresso delle tecnologie digitali, già a partire dagli anni '90, nei campi della produzione, distribuzione e diffusione televisiva e le nuove prospettive offerte agli operatori del settore e all'industria di consumo, hanno portato alla costituzione nel 1993 del Progetto europeo DVB (Digital Video Broadcasting). Il Progetto, che ora raccoglie oltre 300 Membri europei ed extraeuropei, ha l'obiettivo di armonizzare le strategie volte all'introduzione della televisione digitale e dei nuovi servizi multimediali e interattivi sui vari mezzi trasmissivi e definire le relative specifiche tecniche. Il primo significativo risultato è stato raggiunto con la definizione della specifica del sistema DVB-S per la diffusione diretta da satellite di TV multi-programma, alla quale ha contribuito direttamente il Centro Ricerche Rai [1],[2],[3]; subito dopo sono state definite le specifiche del sistema DVB-C per la distribuzione dei segnali televisivi attraverso le reti via cavo [4] e, successivamente, una intera "famiglia" di specifiche che, partendo dal mondo della televisione, si sono progressivamente allargate a interessare lo scenario delle tecnologie emergenti e dei nuovi media. Le specifiche tecniche approvate dal DVB vengono ratificate dall'ETSI che ne attribuisce la veste di standard europei.

All'interno della famiglia DVB le specifiche per la televisione digitale terrestre (DVB-T) assumono una importanza rilevante data la valenza "universale" del servizio televisivo che, nel nostro Paese, raccoglie quasi il 100% dell'utenza. La definizione della specifica DVB-T risale al novembre 1995, con approvazione come standard ETSI nel febbraio 1997 [5]; il processo di normaliz-

Fig. 1 - Diagramma a blocchi funzionale del sistema di trasmissione DVB-T

zazione, piuttosto lungo e complesso, è stato influenzato da vari fattori: la complessità tecnica del problema, dovuta anche alla maggiore ostilità della propagazione del segnale elettromagnetico nelle bande terrestri VHF/UHF rispetto alla diffusione via satellite, la congestione dello spettro di frequenza per la diffusione televisiva terrestre in gran parte dell'Europa ed in particolare nel nostro Paese, l'interesse di soddisfare nuove modalità operative su reti isofrequenziali (SFN) anche a grande copertura, i diversi piani di introduzione dei servizi digitali terrestri formulati dalle varie Amministrazioni europee.

Un contributo decisivo alla definizione delle specifiche DVB-T è stato dato dall'attività condotta dai maggiori radiodiffusori in ambito al progetto europeo RACE dTTb ed a progetti nazionali (HD-DIVINE e HDTV-T), che hanno successivamente adeguato i rispettivi piani di ricerca e sviluppo per soddisfare i requisiti di servizio definiti dal Modulo Commerciale del DVB.

Fra questi:

- la necessità di mantenere la maggior comunanza possibile con i sistemi DVB-S e DVB-C, al fine di consentire la produzione di ricevitori commerciali multi-standard a basso costo;
- la possibilità di ricezione fissa con terminali portatili, dotati di antenna omnidirezionale, in aggiunta alla ricezione con antenna direttiva posta sul tetto degli edifici;
- la possibilità di introdurre reti SFN a larga copertura (regionale e nazionale) impiegando trasmettitori sincronizzati operanti sullo stesso canale a radiofrequenza (RF), al fine di sfruttare i significativi vantaggi in termini di efficienza spettrale rispetto alle reti convenzionali multi-frequenza (MFN).

L'articolo descrive le caratteristiche principali del sistema DVB-T (Sezione 2) e ne illustra in dettaglio le prestazioni valutate per mezzo di simulazioni software al calcolatore (Sezione 3) che hanno trovato

un sostanziale riscontro nelle valutazioni effettuate in laboratorio [6] e sul campo [7], in vista della prossima introduzione nel nostro Paese dei primi servizi di televisione digitale terrestre [8].

2. La specifica DVB-T

Il sistema DVB-T, la cui architettura generale è mostrata in figura 1, è basato sull'adozione degli standard MPEG-2 per la Codifica del segnale audio/video di sorgente e per la Multiplazione: è stato sviluppato per la trasmissione di segnali televisivi multi-programma a definizione convenzionale nel formato MPEG-2 MP@ML, ma è aperto all'evoluzione verso l'alta definizione (HDTV) mediante l'uso di livelli e profili MPEG-2 più elevati.

Gli elementi indicati con un bordo rosso nel diagramma a blocchi di figura 1 sono comuni al sistema DVB-S. Essi includono: la struttura di trama (derivata dal Multiplatore di Trasporto MPEG-2), la dispersione dell'energia del segnale per uniformare la distribuzione spettrale all'interno del canale RF, una sofisticata tecnica di protezione dagli errori tramite concatenazione di un codice esterno con un codice interno a tasso di codifica variabile mediante processo di interlacciamento. Il codice esterno è il Reed-Solomon RS(204,188, t=8) accorciato, derivato dall'originale codice sistematico RS(255,239, t=8). I codici interni sono convoluzionali punturati, basati su un codice convoluzionale madre a tasso 1/2 con 64 stati. Oltre al codice madre, il sistema permette i tassi punturati di 2/3, 3/4, 5/6 and 7/8. L'interlacciatore è basato sul processo di interlacciamento convoluzionale di Forney ed ha profondità pari a 12.

2.1 Modulazione e Codifica di Canale

Il cuore del sistema DVB-T risiede nell' "Adattatore di canale" che è stato progettato specificatamente per fornire la massima comunanza con i sistemi via satellite e cavo e garantire le migliori prestazioni nella diffusione del segnale sui canali televisivi terrestri. Esso include la modulazione digitale e la codifica di canale per la correzione degli errori di trasmissione.

Il tipo di modulazione digitale adottato dal DVB differisce sensibilmente per i sistemi via satellite, via cavo e sui canali terrestri, in quanto deve adattarsi strettamente alle diverse caratteristiche della propagazione e del canale RF. Il canale via satellite è fondamentalmente non lineare, a larga banda e limitato in potenza: pertanto la modulazione QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) a singola portante adottata nel sistema DVB-S risulta idonea allo scopo. Le reti via cavo sono caratterizzate invece da distorsioni lineari causate dal disadattamento della rete e, sebbene non limitate in potenza, sono soggette a limitazioni di banda; sulla base di questi vincoli, il sistema DVB-C usa modulazioni M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) a singola portante e ad elevata efficienza spettrale, e non include l'interlacciatore e il codice interno; è tuttavia previsto l'impiego nel ricevitore di un equalizzatore adattativo degli echi che possono essere presenti nella rete in cavo.

Il canale terrestre è caratterizzato da propagazione multi-cammino, dovuta alle riflessioni, che può degradare pesantemente il segnale trasmesso (figura 2). Gli echi naturali dell'ordine di alcuni microsecondi e legati all'orografia del terreno, così come gli echi artificiali dell'ordine di centinaia di microsecondi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti SFN, non possono essere

trattati con tecniche di modulazione a portante singola, anche perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto lunghi e complessi. Pertanto, sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche comparative, è stata scelta la modulazione multiportante COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [9] [10], già adottata con successo nel DAB (Digital Audio Broadcasting) [11], il sistema proposto per la diffusione radiofonica digitale.

Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione (figura 3). A ciascuna delle portanti è applicata la modulazione digitale QPSK, M-QAM, ecc...; la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$. Il processo OFDM è attuato per mezzo di una I-FFT (Inverse Fast Fourier Transform).

Il sistema DVB-T è caratterizzato da due modalità operative, la prima con FFT su 2k portanti per reti convenzionali multi-frequenza (MFN), la seconda con FFT su 8k portanti per coprire anche reti a frequenza singola (SFN).

Il sistema COFDM è inerentemente robusto contro il fading selettivo in frequenza presente sul canale terrestre, affetto da propagazione multi-cammino, in quanto le portanti a banda stretta occupano una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è "localmente piatta" e non distorcente (figura 2). La resistenza dei sistemi COFDM contro gli echi è anche basata sulla presenza nel simbolo OFDM di un intervallo di guardia temporale (con durata pari a T_g) che separa simboli OFDM adiacenti (figura 3). L'intervallo di guardia consiste in una continuazione ciclica della parte utile T_u, del simbolo ed è inserito davanti ad essa. Dei campioni complessi che corrispondono ad un simbolo, il ricevitore scarta quelli

Fig. 2 - Modello di propagazione terrestre

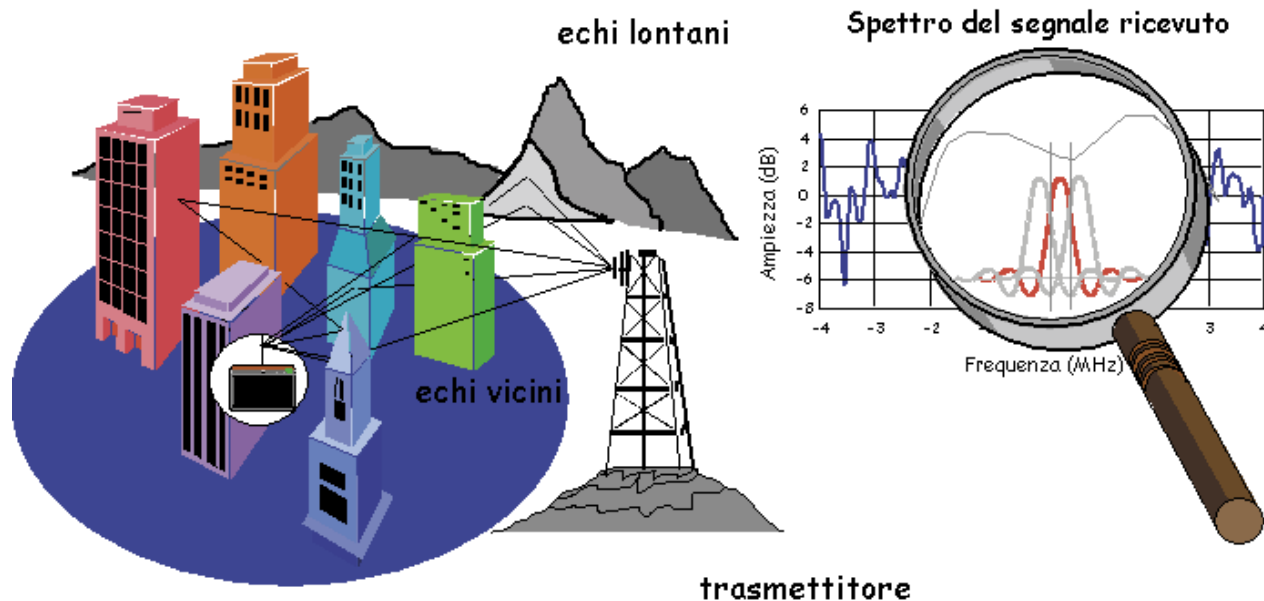
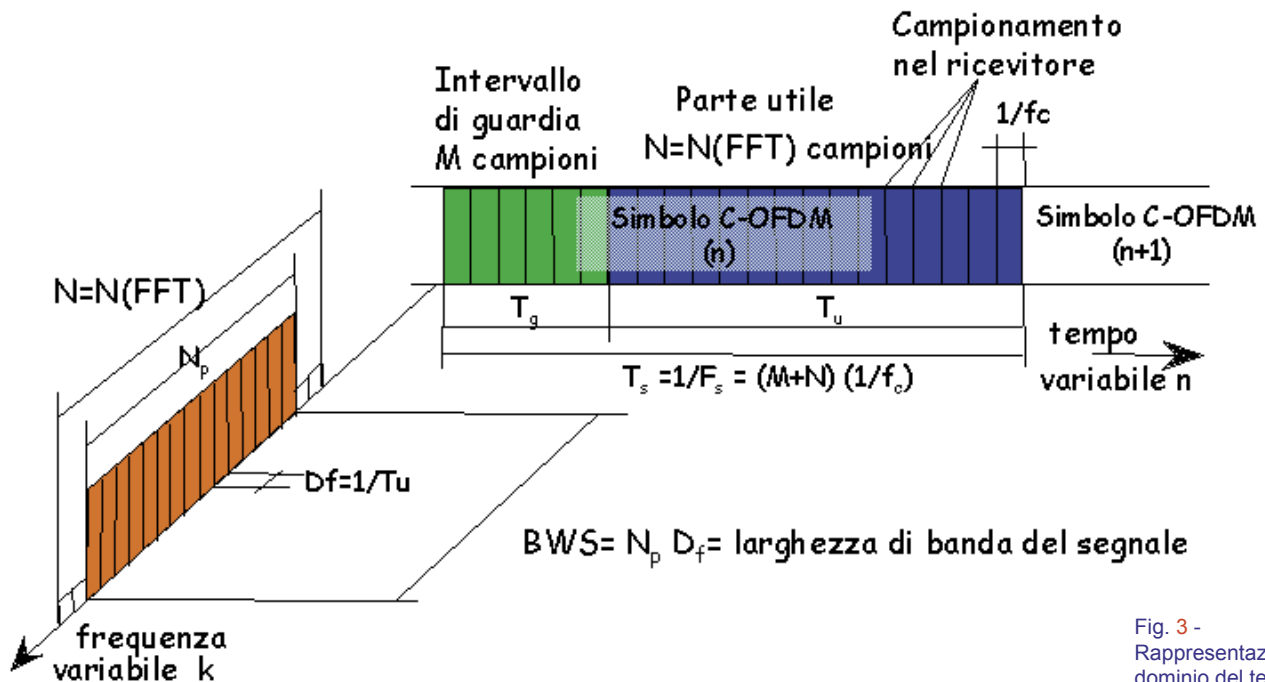
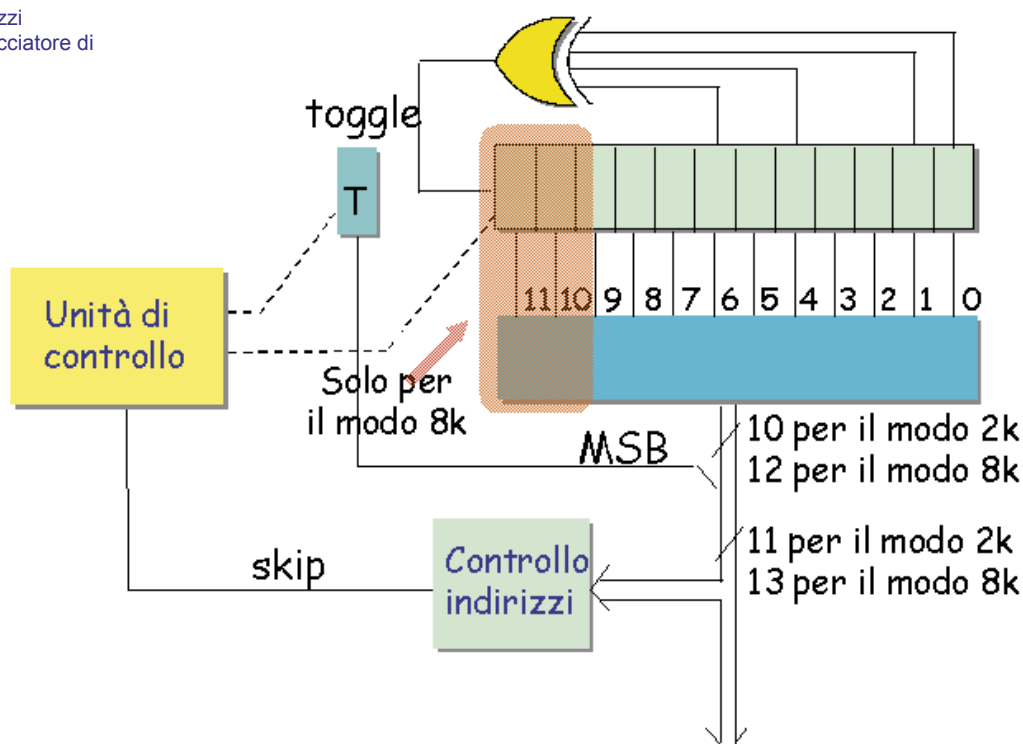



Fig. 3 - Rappresentazione nel dominio del tempo e della frequenza di un simbolo C-OFDM

relativi all'intervallo di guardia, cosicchè gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo t inferiore a T_g non generano ISI (Inter Symbol Interference).

In aggiunta all'intervallo di guardia, il sistema COFDM fa uso di un potente schema di correzione degli errori che permette il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state affette da fading selettivo in frequenza. A questo scopo, dopo la codifica interna (con codice convoluzionale), è presente anche un interlacciatore in frequenza che consente di ottenere la massima dispersione delle portanti corrotte nel flusso dati. L'interlacciatore interno consiste nella concatenazione di un interlacciatore di bit, per separare i bit mappati sui punti della costellazione, e di un interlacciatore di simbolo, per disperdere le portanti che trasportano i dati utili. L'interlacciatore di simbolo è stato sviluppato presso Rai-CRIT, con l'obiettivo di ridurre i requisiti di memoria nel terminale d'utente e, contemporaneamente, massimizzare la dispersione delle portanti adiacenti.

La generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo, rappresentata in figura 4, è caratterizzata da una realizzazione molto semplice che non richiede di memorizzare la regola di interlacciamento nel ricevitore e riduce i requisiti di memoria. Il nucleo è costituito dal classico generatore di sequenza binaria pseudo-casuale a massima lunghezza (PRBS). L'intera sequenza 2k o 8k è ottenuta ripetendo due volte il ciclo PRBS e aggiungendo il bit più significativo (MSB) cambiato ad ogni nuovo valore. La regola di permutazione dei fili è stata ottimizzata con simulazioni al calcolatore per ottenere la massima dispersione delle portanti dati adiacenti. Il blocco di controllo dell'indirizzo verifica che l'indirizzo così generato sia inferiore al numero di portanti dati: se la condizione non è verificata viene generato un altro valore. Al fine di minimizzare ulteriormente l'ammontare di memoria richiesta, la regola di generazione dell'indirizzo è usata come indirizzo di "scrittura" per i simboli

Fig. 4 - Generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo

OFDM pari, e come indirizzo di "lettura" per quelli dispari.

Le portanti dati, che portano le informazioni utili, sono modulate in M-QAM (M=4, 16, 64), con mappatura di Gray. Costellazioni M-QAM non uniformi sono anche previste nel caso di trasmissione gerarchica.

I parametri principali del sistema DVB-T sono riportati in Tabella 1. Il sistema è ottimizzato per canali a 8 MHz (spaziatura di canale in UHF), ma può essere adattato anche su canali da 7 MHz (utilizzati in molti paesi, tra i quali l'Italia) e da 6 MHz (spaziatura adottata in USA e Giappone), modificando opportunamente la frequenza di campionamento nel ricevitore (Nota 1).

Nota 1 - Le tre possibili spaziature di canale in frequenza sono state introdotte nella specifica al fine di permettere la più vasta adozione del sistema DVB-T.

Tabella 1. Parametri del sistema DVB-T (canalizzazione a 8MHz)

Parametro	Modalità 8K				Modalità 2K			
Portanti attive	6817				1705			
Portanti dati	6048				1512			
Durata utile del simbolo T_u	896 μs				224 μs			
Spaziatura fra le portanti $1/T_u$	1116 Hz				4464 Hz			
Larghezza di banda	7,61 MHz							
$\Delta=T_g/T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervallo di guardia T_g	224 μs	112 μs	56 μs	28 μs	56 μs	28 μs	14 μs	7 μs

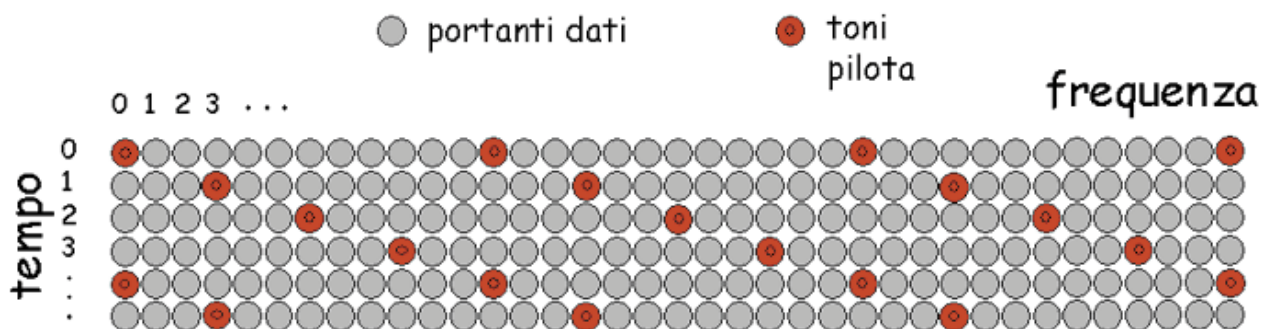



Fig. 5 - Disposizione delle portanti all'interno della trama

2.2 Segnalazione delle Informazioni Ausiliarie

Il segnale digitale trasmesso è organizzato in trame contenenti ciascuna 68 simboli OFDM; 4 trame costituiscono una super-trama, che contiene un numero intero di pacchetti RS (204, 188), indipendentemente dai parametri di modulazione e codifica di canale. Per aumentare l'efficacia degli algoritmi di sincronizzazione e demodulazione nel ricevitore, si adotta una trama OFDM specifica che, oltre alle portanti dati, che trasportano l'informazione, contiene altre portanti destinate a funzioni ausiliarie:

- portanti pilota diffuse, inserite nello spettro con una densità di 1/12 nel dominio della frequenza e di 1/4 nel dominio del tempo (figura 5);
- portanti pilota continue, che occupano la stessa posizione in ogni simbolo OFDM;
- portanti TPS (Transmission Parameter Signalling) in posizione fissa nello spettro OFDM, modulate in DBPSK, su cui sono trasportate informazioni sulla modulazione, gerarchia, durata dell'intervallo di guardia, tasso di codifica interno, modalità di trasmissione, numero di trama nella super-trama.

Il numero di portanti che trasportano dati utili è costante in ogni simbolo OFDM: 1512 nella modalità 2k e 6048 nella modalità 8k. Le altre sono: portanti pilota – trasmesse ad un livello di potenza superiore (+2,5 dB) – e portanti TPS, e possono essere usate per la sincronizzazione di trama, di frequenza, di tempo, per la stima del canale, l'identificazione della modalità di trasmissione e per inseguire il rumore di fase.

2.3 Demodulazione

Sul lato ricevente, viene dapprima estratta la parte utile del simbolo dal segnale ricevuto, rimuovendo l'intervallo di guardia. Poi è applicato il processo di FFT, che restituisce il segnale OFDM nel dominio della frequenza, sul quale è realizzata la demodulazione coerente delle portanti dati: le varie portanti vengono equalizzate in ampiezza e fase dividendo i campioni ricevuti per la stima della risposta in frequenza del canale. Nella modalità di demodulazione adottata dai ricevitori commerciali questa stima è effettuata attraverso l'interpolazione nel tempo e nella frequenza (in ampiezza e fase) delle portanti pilota diffuse.

Per quanto riguarda l'interpolazione nel tempo, sono disponibili due metodi per completare il pettine di portanti diffuse relative ad un dato simbolo OFDM: una semplice accumulazione delle portanti pi-

lota appartenenti agli ultimi quattro simboli OFDM (chiamato algoritmo 1-D) oppure una interpolazione lineare delle portanti pilota precedente e successiva al simbolo OFDM (algoritmo 2-D). Quest'ultimo metodo garantisce al ricevitore una maggiore capacità di inseguire le variazioni del canale, a spese di una maggiore complessità del ricevitore (in particolare, è richiesta maggior memoria).

A causa della densità complessiva del pettine di portanti diffuse nella trama OFDM (una portante pilota ogni tre portanti), la stima della risposta in frequenza del canale, prima dell'interpolazione in frequenza, è sotto-campionata di un fattore 1/3; pertanto la sua Trasformata di Fourier (corrispondente alla stima della risposta all'impulso del canale per tempi negativi, per via della "proprietà duale" della Trasformata di Fourier F{F{x(t)}} = x(-t)) è periodica con periodo normalizzato 1/3.

Al fine di attenuare le ripetizioni spettrali (aliasing) (figura 6) generate dal processo di campionamento, il filtro di interpolazione in frequenza deve fornire una attenuazione fuori banda pari a 20÷30 dB alla frequenza normalizzata 1/3 alla quale si trova la prima ripetizione dello spettro. Inoltre esso dovrebbe essere "piatto" in una banda normalizzata pari a T_f/T_u (indicato nel seguito come intervallo di corretta equalizzazione). L'interpolazione nel dominio del tempo e della frequenza permette anche una piccola riduzione del rumore Gaussiano da cui è affetta la stima della risposta del canale.

In conclusione, la ricezione del segnale DVB-T effettuata utilizzando algoritmi di equalizzazione che sfruttano solo le portanti pilota diffuse – come avviene in genere nei ricevitori commerciali – risente di un rapido degradamento delle prestazioni in presenza di echi che cadono al di fuori dell'intervallo di corretta equalizzazione, normalmente coincidente con l'intervallo di guardia. Questi echi non possono essere equalizzati e, specialmente nella pianificazione di reti a Singola Frequenza, risultano responsabili di interferenza intersimbolica, e come tali provocano un degradamento simile a quello dovuto a rumore Gaussiano scorrelato.

Un algoritmo di equalizzazione della risposta del canale, denominato CD3, che consente di ridurre sensibilmente il de-

Fig. 6 - Interpolazione nel dominio del tempo della funzione di trasferimento del canale

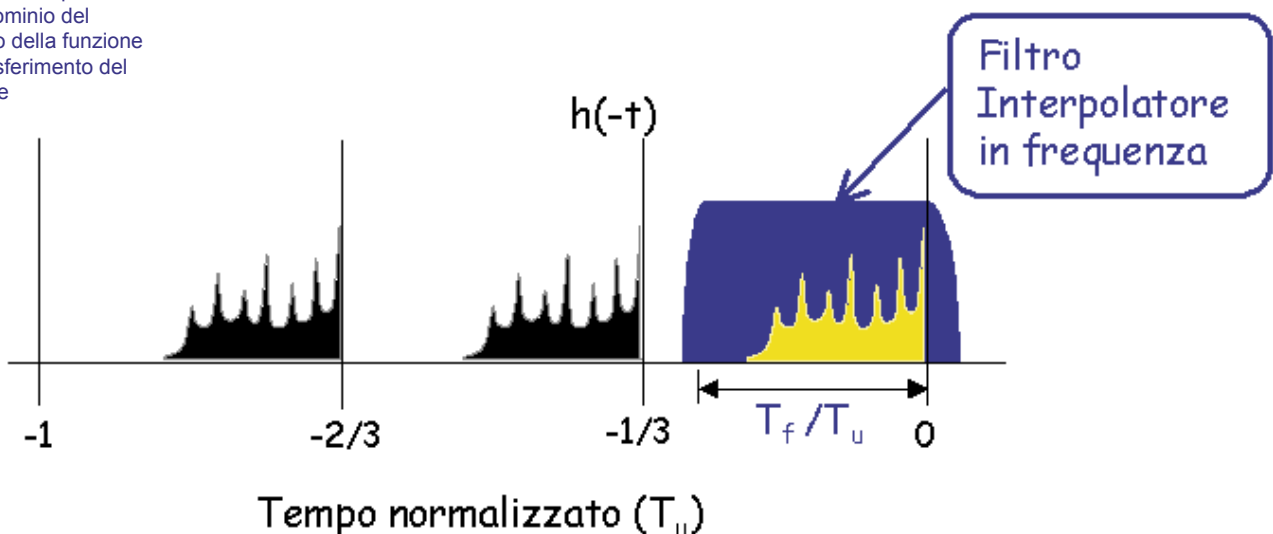



Tabella 2. C/N (dB) richiesto per un ricezione QEF e flusso binario utile (Mbit/s) per tutte le combinazioni di intervallo di guardia, costellazione e tasso di codifica, relativo a sistemi non gerarchici

		C/N richiesto per BER = 2 x 10^{-4} dopo Viterbi QEF dopo Reed-Solomon			Flusso binario utile (Mbit/s)			
		Canale			$\Delta=T_g/T_u$			
Modulazione	Codice	Gaussiano	Rice (F)	Rayleigh (P)	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16QAM	1/2	8,8	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16QAM	2/3	11,1	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16QAM	3/4	12,5	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16QAM	5/6	13,5	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16QAM	7/8	13,9	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64QAM	1/2	14,4	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64QAM	2/3	16,5	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64QAM	3/4	18,0	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64QAM	5/6	19,3	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64QAM	7/8	20,1	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

gradamento delle prestazioni dovuto agli echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia è stato sviluppato da Rai-CRIT [12] [13] con particolare attenzione alla ricezione di segnali DVB-T su reti SFN.

2.4 Prestazioni e Capacità Trasmissiva

Il sistema DVB-T offre una capacità utile per la trasmissione del flusso binario che varia da circa 5 Mbit/s a 31,7 Mbit/s, a seconda della configurazione di trasmissione adottata: costellazione, tasso di codifica del codice correttore interno e dalla durata dell'intervallo di guardia. Per un dato insieme di questi parametri, le modalità operative 2k e 8k offrono la stessa capacità trasmissiva.

Come risulta dalla tabella 2, derivata dall'Annesso A della specifica DVB-T [5], l'impiego di una configurazione ad elevata capacità trasmissiva, come il 64-QAM (rate 7/8; intervallo di guardia normalizzato $\Delta=T_g/T_u$=1/32), comporta però prestazioni meno robuste in termini di rapporto portante/rumore C/N richiesto per una corretta ricezione (circa 26,1 dB su canale affetto da rumore gaussiano). Per contro, un sistema a bassa capacità trasmissiva – come il QPSK (rate1/2; Δ=1/4) – è molto robusto e richiede un basso valore di C/N (circa 3,1 dB). La scelta della configurazione è quindi il risultato di un compromesso tra capacità trasmissiva e robustezza del segnale, in modo da soddisfare i requisiti di servizio.

La tabella 2 riporta, per tutte le combinazioni di costellazione e tasso di codifica previste dalla normativa, le prestazioni del sistema in termini di C/N, valutate

per mezzo di simulazioni al calcolatore; riporta inoltre i valori del flusso binario utile (Mbit/s) in funzione dell'intervallo di guardia normalizzato Δ. I valori del rapporto C/N richiesto si riferiscono alla ricezione Quasi Error Free (QEF), corrispondente a meno di un evento di errore per ora sul segnale all'ingresso del demultiplatore MPEG-2 ($BER<10^{-11}$), dopo che è stato sottoposto al procedimento di correzione degli errori tramite algoritmo di Viterbi e decodifica Reed-Solomon.

Nelle simulazioni è stata ipotizzata una perfetta stima del canale e non sono incluse né la perdita di potenza dovuta alle portanti pilota (paragrafo 2.2) né le perdite dovute alla realizzazione del ricevitore e agli apparati inclusi nella catena di trasmissione. Le prestazioni sono date per un canale ideale affetto esclusivamente da rumore bianco Gaussiano (AWGN) e per due esempi di canale multi-percorso tipici della diffusione terrestre: il canale di Rice (F), rappresenta un tipico caso di ricezione fissa, per il quale è presente la linea di vista con il trasmettitore (segnale principale) più una serie di echi; il canale di Rayleigh (P), è un esempio di ricezione portatile con antenna omnidirezionale, caratterizzato dalla assenza della linea di vista.

I tassi di codifica più alti (5/6 e 7/8), quando vengono associati alla costellazione a più elevata efficienza spettrale (64-QAM), risultano molto sensibili al fading selettivo in frequenza. In pratica, per la stima del massimo numero di programmi TV che possono essere allocati in un canale a 8 MHz, assumendo una ricezione fissa con antenna direttiva, la configurazione più idonea è il 64-QAM a tasso 2/3; essa fornisce una capacità di flusso binario di circa 24 Mbit/s, nel caso di Δ=1/32, che consente tipicamente la trasmissione di 4 programmi a qualità convenzionale (SDTV a 6 Mbit/s ciascuno) o 6 programmi a qualità news (LDTV, 4 Mbit/s ciascuno). Questa configurazione di trasmissione è particolarmente idonea per le reti multifrequenza (MFN). L'impiego della multiplazione statistica associata alla codifica MPEG-2 a bit-rate variabile consente inoltre di aumentare il numero di programmi senza peggiorare la qualità audio/video.

Il processo di equalizzazione nel ricevitore comporta un degradamento del rapporto C/N dovuto alla presenza di rumore sulla funzione di trasferimento del canale stimata. Tale degradamento è dato dall'espressione:

$$\gamma_{CE} = 10 \log\left(1 + \frac{Wk}{\alpha D}\right) = \begin{cases} 1{,}8 \text{ dB per la stima 1-D} \\ 1{,}3 \text{ dB per la stima 2-D} \end{cases}$$

dove:

- W (assunto pari a 0,3 per un intervallo di guardia Δ pari a 1/4) è la banda equivalente di rumore del filtro di interpolazione in frequenza (normalizzato rispetto a T_u)
- α rappresenta il livello di elevazione delle portanti pilota (16/9)
- D è la densità delle portanti pilota dopo l'interpolazione nel tempo (D = Df/Dt =1/3)
- k è il guadagno del corrispondente filtro interpolatore (vale 1 per la stima di canale 1-D e 11/16 per la stima di canale 2-D).

Come risulta dalla formula, si può prevedere un degradamento del rapporto C/N di 1,8 dB o 1,3 dB, a seconda dell'algoritmo di stima del canale adottato. L'algoritmo 1-D, caratterizzato da maggiore semplicità realizzazione e minore requisito di memoria nel ricevitore, introduce il degradamento maggiore.

Un ulteriore degradamento del rapporto

C/N è imputabile alle portanti pilota, che sono trasmesse ad un livello di potenza superiore rispetto alle portanti utili. La perdita di potenza che ne risulta è data da:

$$\gamma_P = 10 \operatorname{Log} \left[\eta_P (1 - \alpha) + \alpha\right] = 0{,}33 \text{ dB}$$

dove h_P rappresenta il rapporto tra portanti utili e TPS (non amplificate) e portanti totali (efficienza delle portanti pilota) che risulta pari a 6116/6817 nella modalità 8k.

3. Valutazione della Copertura

La copertura di un servizio televisivo terrestre si misura attraverso la percentuale di tempo e di località per la quale il servizio è garantito.

La televisione analogica è caratterizzata da un degradamento graduale della qualità del segnale in funzione dell'intensità del campo elettromagnetico ricevuto (e.m.); pertanto gli attuali servizi televisivi analogici sono stati pianificati al 50% del tempo e delle località, secondo le indicazioni della Raccomandazione 370 ITU. Al contrario, nel caso dei sistemi televisivi digitali, al ridursi del campo e.m. si verifica una rapida transizione dalla ricezione quasi perfetta alla perdita del servizio (soglia di ricezione).

La definizione dell'obiettivo e dell'area di copertura è pertanto un punto estremamente critico. In pratica, garantire una disponibilità del servizio per il 99% delle località e del tempo risulta un obiettivo di copertura troppo oneroso a causa dei costi della rete di diffusione: infatti, al fine di coprire anche la percentuale residua delle piccole aree peggio servite, è necessario o incrementare drasticamente la potenza trasmessa o impiegare un numero maggiore di trasmettitori.

Per questa ragione negli studi di pianificazione dei servizi DVB-T è stata adottata dalla CEPT la definizione di copertura "buona" che individua il caso in cui all'interno di una piccola area viene coperto il 95% delle località. Parimenti, con "accettabile" si definisce il caso in cui viene coperto solo il 70% delle località all'interno della stessa piccola area [14]. Queste scelte derivano dalla considerazione che, per una data situazione, la ricezione può essere migliorata anche trovando una posizione più adeguata per l'antenna, usando un'antenna più direzionale o, nel caso di ricezione fissa, impiegando un amplificatore d'antenna a basso rumore con un guadagno più alto.

Una volta definito il valore minimo del rapporto C/N che caratterizza la configurazione del sistema si prendono in esame gli elementi di propagazione, nella gamma di frequenze RF di interesse, derivando dapprima il valore minimo del campo e.m. mediano equivalente, al limite dell'area di copertura, che garantisce la voluta percentuale di località servite. Da questo sono quindi calcolati gli altri parametri di trasmissione, quali potenza del trasmettitore, diagramma d'antenna e configurazione ottimale della rete, usando gli stessi metodi adottati per il servizio analogico.

Condizioni di Ricezione

La tipica condizione di ricezione fissa è individuata dall'impiego di un'antenna direttiva installata sul tetto di un edificio. Per il calcolo del campo e.m. mediano equivalente desiderato, in tabella 3 sono riportati in funzione della frequenza valori realistici di guadagno d'antenna (relativi ad un dipolo a mezza onda) e di perdita sul cavo coassiale di discesa relativi ad un'altezza di 10 m rispetto al terreno.

Tabella 3. Parametri d'antenna per la ricezione fissa

	Frequenza [MHz]		
	200	500	800
Guadagno d'antenna [dB]	7	10	12
Perdita di discesa[dB]	2	3	5

La ricezione portatile è individuata tipicamente da un ricevitore equipaggiato con un'antenna omni-direzionale collegata o integrata posta a 1,5 m rispetto al terreno (in ambiente esterno) o rispetto al pavimento (in ambiente interno). Le condizioni di ricezione differiscono pertanto da quelle di ricezione fissa per l'assenza di guadagno e direttività dell'antenna, per le trascurabili perdite sul cavo di connessione dell'antenna, per la minore altezza di ricezione rispetto al terreno e per la notevole attenuazione del campo e.m. nel caso di ricezione all'interno di edifici. La tabella 4 riassume valori tipici dei vari parametri: guadagno d'antenna, perdita di discesa, perdita di altezza e perdita da penetrazione di edifici (valore mediano) per le bande di frequenza VHF (Banda III, 174÷230 MHz) e UHF (Bande IV and V, 470÷862 MHz).

Definizione dell'Area di Copertura

Nel definire l'area di copertura per ogni condizione di ricezione, è stato adottato un approccio a tre livelli [14]..

Tabella 4. Parametri d'antenna per la ricezione portatile

	Banda di Frequenza	
	VHF	UHF
Guadagno d'antenna [dB]	-2.2	0
Perdita di discesa [dB]	0	0
Perdita d'altezza [dB]	10	12
Perdita di edificio [dB]	8	7

L'unità più piccola è la località di ricezione, nella quale il livello del segnale voluto è sufficiente a sovrastare il rumore e l'interferenza per una data percentuale di tempo (tipicamente 99%).

Il secondo livello è la piccola area di copertura, tipicamente 100 m per 100 m. Al suo interno, a causa delle irregolarità del terreno, il livello del campo e.m. ricevuto è soggetto a variazione casuale con la località, che è caratterizzata da una distribuzione log-normale con deviazione standard di circa 5,5 dB. In funzione della percentuale di località coperte, la copertura per una piccola area è classificata come buona se almeno il 95% delle località al suo interno sono coperte, e accettabile se almeno il 70% delle località sono coperte.

Infine il terzo livello è rappresentato dall'area di copertura di un trasmettitore, o di un gruppo di trasmettitori, formata dalla somma delle piccole aree individuali in cui si raggiunge la prestabilita percentuale di copertura: accettabile (70%) o buona (95%).

3.1 Copertura per un singolo trasmettitore

Le considerazioni riportate nel seguito sono relative alla copertura data da un singolo trasmettitore DVB-T. Le tabelle 5, 6 e 7 danno i valori del campo e.m. minimo E_{min} [dBμV/m] richiesto dal sistema – a seconda della configurazione di trasmissione adottata – per cinque tipici valori del rapporto C/N alla soglia di ricezione QEF: 2, 8, 14, 20 e 26 dB. Riportano inoltre, per la ricezione con antenna direttiva, portatile esterna e portatile interna con antenna omnidirezionale, il livello minimo del campo e.m. mediano E_{med} [dBμV/m] necessario a garantire una ricezione buona e una ricezione accettabile a 10 m di altezza rispetto al terreno, per il 50%

del tempo e nel 50% delle località. Tale valore è calcolato a partire dal valore di E_{min} [dBμV/m] nel punto di ricezione assumendo una cifra di rumore del ricevitore pari a 7dB. I valori riportati nelle tabelle si riferiscono alla Banda IV (500 MHz), con canalizzazione da 8 MHz [14].

La Raccomandazione CCIR 417-3 per la pianificazione del servizio televisivo analogico attribuisce un valore minimo di campo e.m. mediano di 62 [dBμV/m], in Banda IV, per ottenere con antenna ricevente direttiva una qualità d'immagine soddisfacente.

A titolo di esempio, nel caso di un segnale digitale in 64-QAM 2/3 (intervallo di guardia 1/32), si richiede un valore di C/N di circa 20 dB all'ingresso del ricevitore, a cui corrisponde un valore minimo di campo e.m. mediano di 53 [dBμV/m] (tabella 5). Dal confronto tra i valori di campo e.m. richiesti per il servizio televisivo analogico e quello digitale, si deduce che una buona ricezione del segnale digitale nella configurazione 64QAM 2/3 con antenna direttiva può essere ottenuta con un livello di potenza irradiata dal trasmettitore sensibilmente inferiore (9 dB) a quello richiesto dal sistema analogico, con il vantaggio di poter trasmettere, nel flusso di 24 Mbit/s disponibile, almeno quattro programmi SDTV invece di un programma analogico. Nel caso di ricezione portatile esterna agli edifici (tabella 6), sarebbe possibile ottenere una copertura accettabile a spese di un incremento di circa 13 dB della potenza minima trasmessa rispetto al caso della ricezione con antenna direttiva. Per una copertura accettabile all'interno degli edifici (tabella 7) sarebbe necessario aumentare ulteriormente la potenza irradiata di 8 dB.

Limitandoci a considerare il caso della ricezione fissa con antenna direttiva, in un ambiente ideale privo di interferenze da trasmettitori analogici, l'introduzione della televisione digitale potrebbe avvenire riducendo sensibilmente la potenza irradiata dagli attuali trasmettitori analogici. In pratica però l'introduzione dei nuovi servizi DVB-T mira anche a coprire per quanto possibile la ricezione con apparati portatili, essendo questo uno dei valori aggiunti del nuovo sistema rispetto alla soluzione analogica. Ciò richiederebbe un aumento considerevole della potenza irradiata dai trasmettitori, in particolare nel caso di ricezione interna agli edifici a causa dell'attenuazione del campo e.m. Un buon compromesso individuato in ambito CEPT [14] è di adottare per il 64-QAM 2/3 in Banda IV un valore minimo del campo e.m. di pianificazione, nella situazione ibrida analogico-digitale che caratteriz-

Tabella 5. Minimo campo e.m.mediano equivalente per ricezione con antenna direttiva

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBμV/m]	26	32	38	44	50
E_{med} [dBμV/m] per ricezione accettabile	29	35	41	47	53
E_{med} [dBμV/m] per buona ricezione	35	41	47	53	59

Tabella 6. Minimo campo e.m.mediano equivalente per ricezione portatile esterna

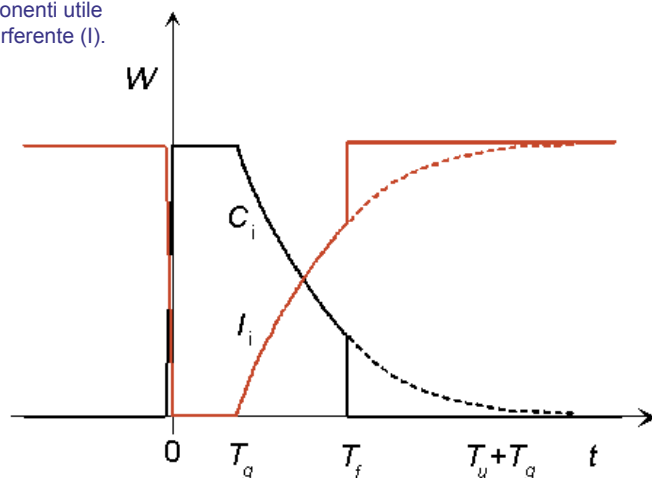
C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBμV/m]	33	39	45	51	57
E_{med} [dBμV/m] per ricezione accettabile	48	54	60	66	72
E_{med} [dBμV/m] per ricezione buona	54	60	66	72	78

Tabella 7. Minimo campo e.m. mediano equivalente per ricezione portatile interna

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{min} [dBμV/m]	33	39	45	51	57
E_{med} [dBμV/m] per ricezione accettabile	56	62	68	74	80
E_{med} [dBμV/m] per ricezione buona	66	72	78	84	90

za la fase iniziale, pari a 65 [dBμV/m], dell'ordine quindi di quello adottato per il servizio televisivo analogico. Si deve osservare però che tale valore è comprensivo di 8 dB imputabili a possibile interferenza cocanale da parte di segnali analogici. A regime, quando tutti i trasmettitori opereranno in digitale, l'interferenza dei trasmettitori analogici sarà rimossa, rendendo così possibile recuperare tutta o in parte questa potenza per migliorare la copertura, in particolare per quanto riguarda la ricezione portatile.

Poiché generalmente i servizi televisivi analogici nelle aree densamente popolate (aree urbane) sono pianificati a potenze largamente superiori al valore minimo richiesto per garantire il servizio ai limiti dell'area di copertura, si può concludere che gli attuali impianti di diffusione analogici – risolti ovviamente i possibili problemi di compatibilità interferenziale nella fase di avvio – potranno essere utilizzati, dopo gli opportuni adeguamenti richiesti dal nuovo standard, per introdurre il servizio digitale aperto alla grande utenza servita attraverso le attuali installazioni condominiali, e con buone possibilità di ricezione portatile.

Fig. 7 - Modello DVB-T per pianificazione SFN: suddivisione della potenza dell'eco (W) nei componenti utile (C) e interferente (I).

3.2 Copertura di una Rete a Singola Frequenza

La configurazione DVB-T idonea per l'impiego sulle reti SFN impiega 8K portanti e intervallo di guardia $T_g=T_u/4$, che consente di operare in presenza di echi molto lunghi e provenienti dai trasmettitori più lontani della rete. In questa situazione, il filtro per la stima del canale di un ricevitore convenzionale deve soddisfare alla diseguaglianza $1/4 < T_f/T_u < 1/3$. Se tali condizioni sono soddisfatte, la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata T_g , cioè all'interno dell'intervallo di guardia, può essere considerata utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, ma all'interno dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f, una parte della potenza dell'eco è associata allo stesso simbolo OFDM del segnale a ritardo nullo, e pertanto contribuisce positivamente alla potenza globale del segnale utile; un'altra parte di potenza dell'eco è associata al simbolo OFDM precedente e produce interferenza d'intersimbolo (ISI), che ha un effetto simile a rumore Gaussiano scorrelato. In aggiunta all'ISI, vi è una perdita di ortogonalità nelle portanti OFDM, indotta dagli echi al di fuori di T_g, che producono ICI (Inter-Carrier Interference). Pertanto, aumentando progressivamente il ritardo dell'eco al di fuori di T_g, il contributo utile C decresce e l'interferenza ISI-ICI I aumenta con legge quadratica. Gli echi con ritardo t maggiore dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f sono quindi da considerarsi come pura interferenza (figura 7).

In formule:

$$C = \sum_i w_i C_i$$
$$I = \sum_i (1 - w_i) C_i$$

$$w_i = \begin{cases} 0 & \text{se } t < 0 \\ 1 & \text{se } 0 \le t \le T_g \\ \left(\dfrac{T_u - t + T_g}{T_u}\right)^2 & \text{se } T_g < t \le T_f \\ 0 & \text{se } t > T_f \end{cases}$$

dove C_i è il contributo di potenza dall'i-esimo trasmettitore e w_i è il coefficiente di peso per la i-esima componente.

Il sistema DVB-T, con demodulazione convenzionale, è pertanto caratterizzato da un degradamento rapido delle prestazioni in presenza di echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia.

Il sistema DAB per la diffusione radiofonica digitale [11] ha invece un intervallo di corretta equalizzazione T_f pari alla durata totale del simbolo T_g+T_u, in quanto impiega la demodulazione differenziale e non richiede stima di canale ed equalizzazione nel ricevitore. E' pertanto un "sistema a degradamento progressivo delle prestazioni".

Valutazione dei requisiti di C/N

Il sistema DVB-T può operare soddisfacentemente (flusso binario quasi senza errori QEF) su un canale affetto da rumore (N) e da interferenze (I) quando il rapporto totale C/(N+I) disponibile è maggiore o uguale all'Equivalent Protection Target (EPT) del sistema. Il parametro EPT ha una interpretazione fisica simile a quella del rapporto C/N richiesto dal sistema di modulazione/codifica, ma include anche il degradamento dovuto agli echi entro l'intervallo di equalizzazione T_f, che determina la criticità (selettività in frequenza) del canale. La seguente espressione empirica, in cui tutti i termini sono espressi in dB, è stata proposta da Rai-CRIT sulla base di simulazioni al calcolatore per stimare EPT:

$$EPT = \frac{C}{N}\Big|_F + \left(\frac{C}{N}\Big|_P - \frac{C}{N}\Big|_F\right)\left(\frac{0.5}{\left(\frac{C}{N}\Big|_P - \frac{C}{N}\Big|_F\right)}\right)^{\frac{K_A}{10}} + \delta$$

dove:

- EPT è l'Equivalent Protection Ratio richiesto dal sistema in una particolare configurazione interferenziale,
- $C/N|_F$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rice (tabella 2).
- $C/N|_P$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rayleigh (tabella 2)
- K_A rappresenta la "criticità del canale dovuta ad echi artificiali", espressa come rapporto (in dB) tra la potenza ricevuta dal segnale principale e la potenza totale degli echi entro l' intervallo di corretta equalizzazione T_f (se $K_A < 0$ dB, K_A è posto a 0 dB, il caso più critico),
- δ è il margine di implementazione (posto rispettivamente a 2,5 e 3 dB per stima del canale CD3-OFDM e convenzionale).

Nei valori relativi al modello ideale, le espressioni 1 e 2 sono risolte numericamente per ottenere il rapporto g tra la potenza degli echi entro l'intervallo di guardia e degli echi al di fuori corrispondente alla condizione di ricezione QEF (BER= 2.10^{-4} dopo decodifica di Viterbi).

4. Conclusioni

Il sistema DVB-T per la diffusione televisiva digitale terrestre nelle bande VHF/UHF rappresenta un importante risultato nel processo di digitalizzazione condotto dal DVB sui vari media. Basato sulla modulazione multiportante COFDM, il sistema consente una notevole flessibilità operativa grazie ad una varietà di configurazioni di trasmissione mirate a ottimizzare le prestazioni a seconda dei requisiti di servizio (ricezione stazionaria con antenna direttiva e con terminali portatili e ricezione mobile) e delle caratteristiche del canale di diffusione terrestre, caratterizzato dalla presenza di riflessioni multiple.

Le prospettive del DVB-T, nell'attuale scenario dei servizi televisivi analogici, trovano un punto di forza nella possibilità di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse in frequenza, attraverso l'introduzione di reti isofrequenziali (SFN), e di diversificare ed aumentare drasticamente l'offerta di programmi (tipicamente almeno 4 programmi TV arricchiti da applicazioni multimediali per canale a radiofrequenza).

Rai-CRIT ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB-T, alla validazione del sistema in laboratorio e sul campo e al miglioramento delle sue prestazioni in situazioni critiche di ricezione. Il sistema è ora maturo per l'introduzione dei primi servizi operativi nel nostro Paese.

Bibliografia

1. M.Cominetti, A.Morello: "Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications". International Journal on Satellite Communications; 2000; 18, p.393-410
2. M.Cominetti, A.Morello: "Il sistema europeo (DVB-S) per la diffusione televisiva da satellite". Elettronica e Telecomunicazioni, n°3, 1994
3. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite service"; EN 300 421, 1993
4. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for cable systems"; EN 300 429, 1994
5. ETSI: "Digital broadcasting systems for television, sound and data services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television"; EN 300 744, 1997
6. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone: "Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
7. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
8. M.Cominetti: "La televisione digitale terrestre in Italia"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
9. Cimini: "Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transaction on Communications, COM-33, p.665-675, July 1985
10. M.Alard, R.Lassalle: "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers", EBU Technical Review, n° 224, August 1987
11. ETSI: "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers"; EN 300 401, 1996
12. V.Mignone, A.Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", IEEE Transactions on Communications, COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996
13. V.Mignone, A.Morello, B.Sacco, M.Visintin, "CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su reti a singola frequenza (SFN)"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°2, 2002
14. CEPT: " The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)"; Chester, July 1997

CD3-OFDM:
una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su rete isofrequenza

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Bruno **Sacco**,
ing. Michele **Visintin**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

L'articolo descrive l'algoritmo CD3-OFDM (Coded Decision Directed Demodulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), sviluppato da Rai-CRIT per migliorare la copertura delle reti digitali televisive terrestri (DVB-T) a singola frequenza (SFN, Single Frequency Network), attraverso l'equalizzazione in ampiezza e fase del segnale OFDM ricevuto via etere. Le relative prestazioni, valutate con simulazioni al calcolatore, prove di laboratorio ed in area di servizio, utilizzando un prototipo di ricevitore CD3-OFDM sviluppato da Rai-CRIT, ne evidenziano le potenzialità ed i vantaggi rispetto ai ricevitori convenzionali. Ciò consente di estendere l'area di copertura e la disponibilità del servizio sulle reti SFN, in modo particolare in condizioni critiche di ricezione, come risulta nei seguenti casi: impiego di antenne omnidirezionali nei ricevitori portatili, configurazioni di trasmissione DVB-T a capacità elevata (ad esempio 64QAM 2/3) e distanze elevate tra i trasmettitori della rete.

1. Introduzione

Nella fase di definizione dei requisiti commerciali del sistema per la diffusione digitale televisiva terrestre DVB-T [1], grande importanza è stata data alla possibilità di operare su reti a singola frequenza (SFN, *Single Frequency Network*); ciò consente un grande risparmio di risorse di banda per i servizi a larga copertura (regionale e nazionale). Per un programma televisivo analogico a copertura nazionale sono infatti normalmente richiesti dai 5 ai 10 canali a radiofrequenza [2]. La possibilità del DVB-T di trasmettere sulla stessa frequenza su grandi aree geografiche, acquista quindi un notevole valore strategico in quanto consente di liberare molti canali da destinare ad altri servizi, permettendo il riordino delle frequenze dedicate ai servizi di radiodiffusione terrestre nelle bande VHF e UHF [3].

Nella scelta dello schema di modulazione da adottare, tra le classiche modulazioni a singola portante, adottate ad esempio nella diffusione digitale terrestre statunitense ATSC [4], e le più recenti modulazioni multiportante OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5], [6], [7], già utilizzate nel sistema per la radiofonia digitale DAB [8], la scelta è caduta proprio sull'OFDM, in quanto più adatto ad un funzionamento in presenza di echi con ritardi elevati, quali sono quelli introdotti dai vari trasmettitori di una rete SFN.

I parametri definiti dallo standard DVB-T sono tali per cui il ricevitore convenzionale riesce ad equalizzare tutti gli echi che giungono al ricevitore in una finestra temporale (intervallo di guardia) al massimo di 224 ms [2]; ciò corrisponde ad una differenza di cammino fra le varie componenti del segnale ricevuto di circa 67,2 km. Questo permette di fronteggiare sufficientemente bene gli echi provenienti dai trasmettitori adiacenti al trasmettitore principale, ma non da quelli più lontani (di seconda fascia), come verificato in [2]. Tali echi si comportano quindi come segnali interferenti che degradano sensibilmente la qualità di ricezione e determinano una notevole riduzione della copertura dell'area di servizio, ben al di sotto dei livelli definiti dai criteri di pianificazione.

Per poter garantire il servizio in SFN anche nelle aree più sfavorevoli, il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai ha proposto e sviluppato un sistema di equalizzazione avanzato, da integrarsi nel ricevitore DVB-T, in grado di garantire la corretta ricezione anche in presenza di echi significativi al di fuori dell'intervallo di guardia. Il sistema si basa sull'algoritmo CD3-OFDM [Nota 1] (Coded Decision Directed Demodulation – OFDM), per

Nota 1.
Brevetto del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai.

l'equalizzazione in ampiezza e fase di sistemi OFDM [9] [10] [11]. Grazie ad un anello retroazionato in cui i segnali ricevuti (componente principale ed echi) vengono demodulati e corretti dal codice correttore FEC (*Forward Error Correction*) presente nella catena, l'algoritmo stima la funzione di trasferimento del canale di trasmissione per ogni portante dello spettro del segnale OFDM (2K o 8K previsti dallo standard DVB-T); l'algoritmo non necessita di filtri interpolatori di frequenza né della trasmissione di portanti di riferimento all'interno dello spettro. Inoltre, è totalmente trasparente allo standard di trasmissione DVB-T.

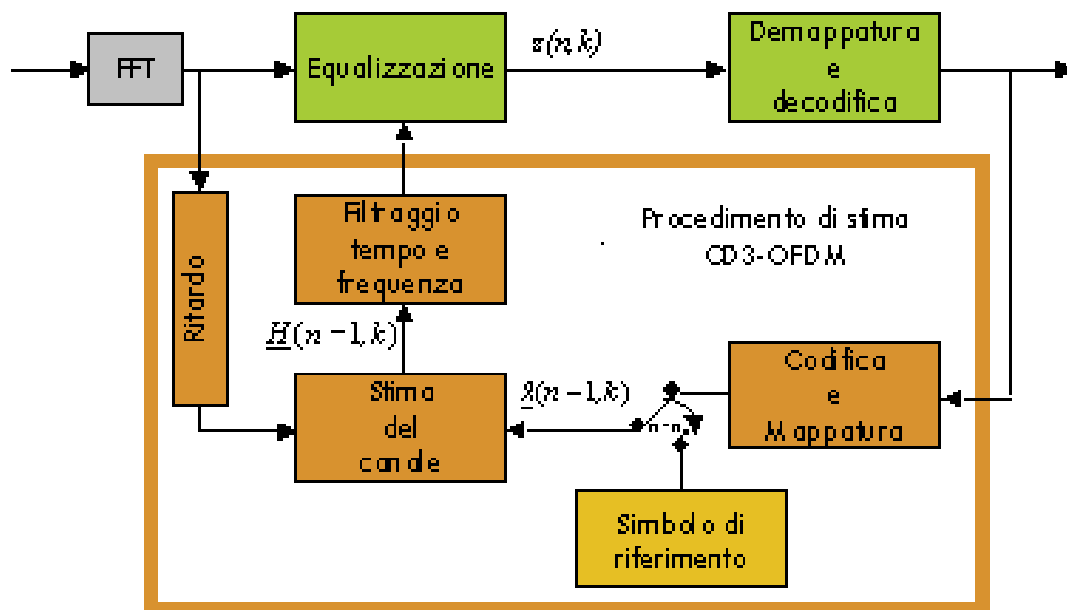
L'algoritmo CD3-OFDM, proposto dal Centro Ricerche Rai durante la fase di elaborazione della specifica DVB-T, avrebbe consentito inoltre un aumento della capacità trasmissiva (di circa l'8%) grazie alla possibilità di eliminare le portanti pilota di riferimento sparse nel segnale DVB-T trasmesso [2], che sono invece indispensabili per consentire l'equalizzazione del segnale nei ricevitori convenzionali. L'impiego delle portanti pilota è stato mantenuto nello standard DVB-T definitivo. Tuttavia le peculiarità della soluzione CD3-OFDM si sono rivelate significative essenzialmente in due condizioni:

- per aumentare la copertura del territorio nel caso di grandi reti a singola frequenza caratterizzate da echi con ritardi molto lunghi (direttamente legate alla distanza tra i trasmettitori) oppure, in alternativa,
- per ridurre il numero degli impianti trasmittenti su una determinata area di copertura.

Il ricevitore CD3-OFDM è caratterizzato infatti da prestazioni elevate anche in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia il cui effetto è di determinare un degradamento graduale delle prestazioni con l'aumentare del ritardo dell'eco [11] [12]; ciò porta ad aumentare la reiezione del ricevitore all'auto-interferenza di rete dovuta ai trasmettitori più distanti, consentendo di operare con rapporto di protezione cocanale C/I significativamente inferiore di quello richiesto dai ricevitori convenzionali. I ricevitori convenzionali subiscono invece un degradamento rapido delle prestazioni in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia, che può essere contenuto solo a prezzo di ridurre significativamente la distanza tra i trasmettitori della rete, la cui diretta conseguenza è di aumentare il numero dei trasmettitori a parità di area servita.

2. I principi della demodulazione CD3-OFDM

Come per un ricevitore convenzionale, un ricevitore basato sull'algoritmo CD3-OFDM, necessita di equalizzare le distorsioni introdotte dal canale per poter demodulare correttamente le costellazioni su ciascuna portante dati del simbolo OFDM ricevuto. Anziché effettuare la stima mediante le portanti pilota inserite nel simbolo OFDM, il ricevitore CD3-OFDM sfrutta il segnale OFDM ricevuto al simbolo precedente, demodulato e corretto dai potenti codici correttori inseriti nella catena di trasmissione. Il principio di funzionamento del ricevitore CD3-OFDM è rappresentato in figura 1, e si basa su di un anello retroreazionato di elaborazione dei simboli ricevuti. Data la periodica inserzione di un simbolo noto nella trama OFDM, il ricevitore CD3-OFDM effettua la stima della funzione di trasferimento del canale, come rapporto, portante per portante, tra il segnale ricevuto dopo trasformata FFT ed il valore noto del segnale trasmesso. Supponendo che il canale di trasmissione evolva lentamente nel tempo, la funzione di trasferimento del canale stimata viene poi utilizzata dal ricevitore CD3-OFDM per equalizzare il simbolo OFDM successivo. Da questo punto in poi è il segnale ricevuto che, dopo equalizzazione, demodulazione e correzione d'errore, viene rimodulato e codificato e svolge la funzione di segnale di riferimento, per la stima della funzione di trasferimento del canale relativa al simbolo successivo. Tale segnale non è privo di rumore e di errori (il tasso d'errore sul bit nel punto operativo del dispositivo è normalmente dell'ordine di 10^{-2} sul canale, e viene riportato a circa 10^{-4} dopo correzione da parte del decodificatore di Viterbi), ma il processo di filtraggio nel dominio del tempo e della frequenza, effettuato sulla funzione

Fig. 1 - Schema base del ricevitore CD3-OFDM

di trasferimento del canale stimata, permette di mitigare sia il livello di rumore che i picchi dovuti ad errori non corretti. Ovviamente, tanto più saranno strette le bande dei filtri, tanto più lento sarà il processo di inseguimento delle variazioni del canale nel tempo (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio del tempo) e tanto minore sarà l'intervallo di corretta equalizzazione T_f (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio della frequenza), che in assenza di filtraggio sarebbe pari a tutto il simbolo utile OFDM T_u. Accettando di equalizzare echi con ritardo fino a metà della durata del simbolo utile $T_u/2$ (ciò raddoppia comunque il massimo ritardo d'eco equalizzabile rispetto al ricevitore convenzionale), si riduce la componente di rumore sulla funzione di trasferimento del canale di 3 dB. Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo, che media su due campioni temporalmente consecutivi potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale, facendo tendere le prestazioni C/N del sistema al caso della demodulazione coerente ideale. Corrispondentemente il tempo di coerenza richiesto alle variazioni del canale di trasmissione passa da un simbolo OFDM, come nel caso della demodulazione differenziale, a due, rallentando la velocità di inseguimento di un eventuale effetto Doppler.In Appendice A è illustrato in modo dettagliato l'algoritmo CD3-OFDM.

Per adattare l'algoritmo al sistema DVB-T, che non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento, è stato sviluppato un algoritmo di aggancio iniziale[Nota 1] in base alle portanti di riferimento inserite nel simbolo DVB-T. L'algoritmo, descritto in dettaglio in Appendice B, effettua una prima stima della funzione di trasferimento del canale utilizzando tali portanti di riferimento; nel caso siano presenti echi al di fuori dell'intervallo di guardia e quindi tale stima non risulti corretta, viene attivata una seconda fase di inizializzazione più lenta, che attraverso un'operazione di media temporale sulle portanti dati, effettuata su un numero elevato (40¸50) di simboli OFDM, permette di stimare la funzione di trasferimento per tutte le portanti dello spettro OFDM (come schematicamente illustrato in figura 2).

Simulazioni al calcolatore hanno dimostrato che, per il sistema 64QAM 2/3 con FFT su 8K punti, l'aggancio è possibile con scostamenti Doppler fino a 0,5 Hz per un eco da 0 dB e ritardo Tg. Raggiunto l'aggancio la velocità d'inseguimento del canale del ricevitore ritorna ad essere quella tipica del CD3-OFDM.

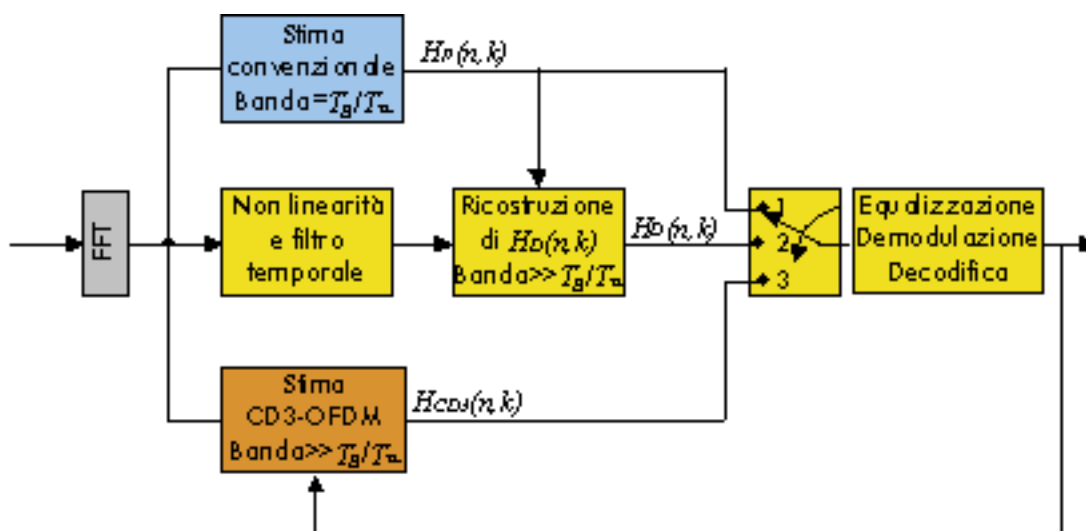



Fig. 2 - Procedimento d'aggancio CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T.

3. Valutazione al calcolatore delle prestazioni del sistema CD3-OFDM

Le prestazioni del CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T sono state analizzate al calcolatore in presenza di varie combinazioni di echi fuori e dentro l'intervallo di guardia, con la seguente configurazione di trasmissione: FFT su 8K punti, intervallo di guardia $T_g = T_u/4$=224 ms, schemi di modulazione e codifica 64QAM 2/3, 16QAM 1/2 e QPSK 1/2. Si sono paragonati due tipi di ricevitore:

- convenzionale, basato per la stima della funzione di trasferimento del canale sulle portanti pilota, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u = T_g/T_u$;
- CD3-OFDM filtrato nel dominio del tempo e della frequenza, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u = 2T_g/T_u$ e filtro temporale che media su due campioni successivi.

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM in presenza di soli echi interni all'intervallo di guardia si sono rivelate leggermente migliori rispetto a quelle di un ricevitore convenzionale (0,5 dB rispetto al metodo di stima 2-D, 1 dB rispetto al metodo 1-D [2]), grazie alla maggiore capacità di filtrare il rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

I risultati riportati in figura 3 si riferiscono alla configurazione 64QAM 2/3 e ad un canale con un eco a 0 dB e ritardo Tg ed un secondo con ritardo variabile . Le curve riportano il valore del massimo livello di interferenza (G [dB], rapporto tra la potenza del segnale utile e l'interferenza) al variare del ritardo normalizzato dell'eco /Tg, tale da garantire un tasso d'errore sul bit (BER, Bit Error Rate) di 2×10-4 dopo la decodifica di Viterbi [Nota 2] in assenza di rumore. Come riferimento è anche riportata la curva relativa al "ricevitore ideale a degradamento progressivo delle prestazioni"[Nota 3],

Nota 2. Tale valore corrisponde a meno di un errore per ora di trasmissione all'uscita del demultiplatore MPEG-2, definito come qualità dell'immagine quasi immune da errori (QEF, Quasi Error Free).

Fig. 3 - Massimo livello d'eco per avere un BER di 2×10-4 dopo decodifica di Viterbi in assenza di rumore per la configurazione 64QAM 2/3

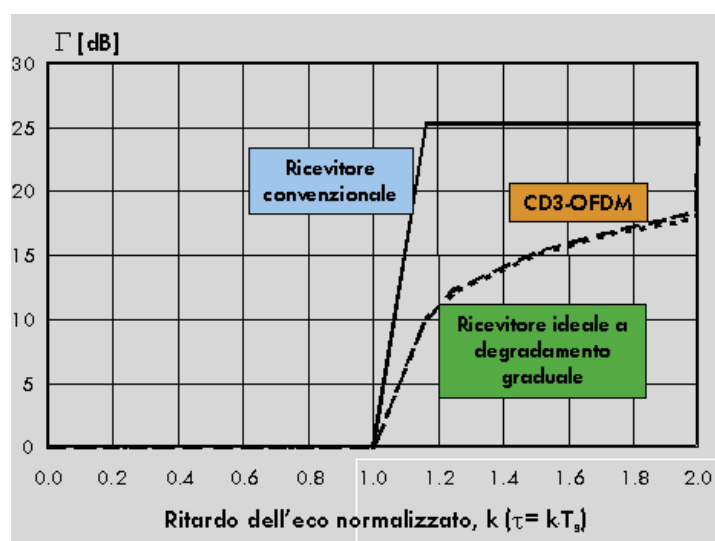
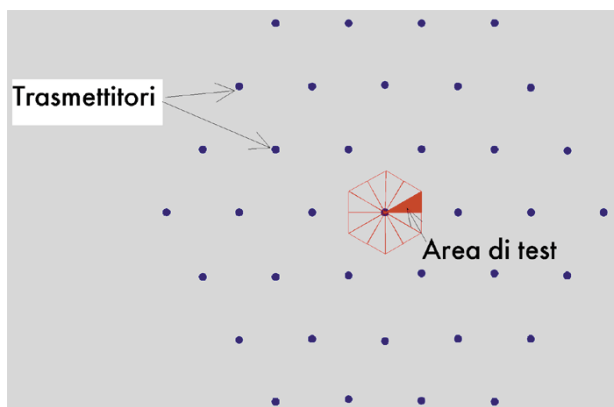



Fig. 4 - Configurazione di trasmettitori in SFN regolare

in grado di equalizzare correttamente tutti gli echi con ritardo minori della durata del simbolo OFDM (definito secondo il modello matematico descritto in [2], con $T_f = T_u + T_g$).

Il tempo di convergenza dell'algoritmo di aggancio è normalmente dell'ordine di 10¸20 simboli OFDM, 40 nei casi più critici.

Ulteriori simulazioni con i sistemi 16QAM 1/2 e QPSK 1/2 hanno dimostrato come il CD3-OFDM approssimi bene il "ricevitore ideale a degradamento graduale" se □ è maggiore di 3¸4 dB, valore che rappresenta il massimo livello d'eco al di fuori dell'intervallo di guardia in grado di permettere l'aggancio (in particolare il recupero dell'ambiguità di fase di π/2, come illustrato in appendice). Da notare comunque come nel caso della configurazione QPSK 1/2, l'aggancio viene sempre raggiunto nella Fase 1 del procedimento, grazie alla sua maggiore robustezza a rumore o disturbi sulla costellazione.

4. Miglioramento della copertura in reti a singola frequenza

Per valutarne i vantaggi offerti dai ricevitori CD3-OFDM rispetto a quelli convenzionali ottenibili con equalizzazione basata sulle sole portanti pilota in termini di coperture di servizio, sono stati effettuati alcuni esercizi di pianificazione. La struttura di rete considerata è la griglia esagonale con 37 trasmettitori a distanza D dagli adiacenti, dotati di antenne omnidirezionali poste a 300 metri di altezza. Si è applicato il modello probabilistico della Raccomandazione ITU-R 370 per la propagazione terrestre nella banda UHF relativo al 50% del tempo per i contributi di segnali interni all'intervallo di guardia e 1% per gli altri, entrambi con distribuzione log-normale del campo nelle locazioni dell'area di servizio e deviazione standard di 5,5 dB. Data l'elevata simmetria della struttura si è valutata la probabilità minima di copertura solo su una piccola porzione (colorata in rosso in figura 4) dell'area totale.

Le coperture sono state calcolate sia nel caso di ricezione fissa, con antenna direzionale posta a 10 m d'altezza[Nota 4], e ricezione portatile in ambiente esterno con antenna omnidirezionale posta a 1,5 m di altezza[Nota 5].

I ricevitori DVB-T disponibili in commercio operano strategie di sincronizzazione e posizionamento della finestra temporale del ricevitore diverse [13]: nello studio qui presentato

Nota 3.
Per il ricevitore ideale "a degradamento graduale" la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata Tg è utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, una parte della potenza dell'eco, decrescente con aumentare del ritardo dell'eco, è associata allo stesso simbolo OFDM del segnale a ritardo nullo, e pertanto contribuisce positivamente alla potenza globale del segnale utile; un'altra parte di potenza dell'eco, crescente con aumentare del ritardo dell'eco, è associata al simbolo OFDM precedente e produce interferenza d'intersimbolo (ISI), che ha un effetto simile a rumore Gaussiano scorrelato. In aggiunta all'ISI, vi è una perdita di ortogonalità nelle portanti OFDM, indotta dagli echi al di fuori di Tg, che producono ICI (Inter-Carrier Interference). Pertanto, aumentando progressivamente il ritardo dell'eco al di fuori di Tg, il contributo utile C decresce e l'interferenza ISI-ICI I aumenta con legge quadratica.

Nota 4.
Con guadagno di 10 dB fino a 20°, decrescente linearmente fino a -6 dB a ±60° e fattore fronte-retro di 16 dB.

Nota 5.
Si è posto il fattore di conversione d'altezza da 10 m a 1,5 m a 12 dB.

si è considerato il caso più favorevole, in cui la finestra viene posizionata in modo da massimizzare la potenza utile totale rispetto alla potenza interferente.

Nelle valutazioni si sono analizzate diverse configurazioni di trasmissione, tutte basate su FFT su 8K punti e intervallo di guardia T_g = 224 ms, tipici per trasmissione su rete a singola frequenza. Si sono paragonati le coperture ottenute per i due tipi di ricevitore descritti nella sezione 3.

Per tutte le 15 configurazioni di modulazione e codifica non gerarchiche della norma DVB-T, si è valutata l'autointerferenza della rete SFN in assenza di rumore, in termini della probabilità di copertura minima ottenibile dell'area di servizio. Come illustrato in figura 5, dove la distanza tra i trasmettitori è di 60 Km, il ricevitore CD3-OFDM, grazie ad un intervallo di corretta equalizzazione T_f doppio rispetto al ricevitore convenzionale, consente di raggiungere coperture sensibilmente maggiori.

Ad esempio, in ricezione portatile un ricevitore convenzionale garantisce il 95% di copertura (livello definito in sede internazionale [14] come "buono") solo per le configurazioni QPSK-1/2 (5 Mbit/s) e QPSK-2/3 (6,6 Mbit/s), mentre con il ricevitore CD3-OFDM è possibile aumentare la capacità trasmissiva, a parità di copertura del servizio, anche fino a 15 Mbit/s circa, mediante le configurazioni di trasmissione utilizzanti 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-1/2 (15 Mbit/s); in pratica la ricezione tramite un ricevitore CD3-OFDM nelle aree più critiche consente di aumentare la capacità trasmissiva del canale di più del doppio. Inoltre la copertura portatile si mantiene "accettabile" (probabilità di copertura minima del 70%, [14]) anche fino alla configurazione 64QAM-3/4, che trasporta più di 22 Mbit/s. Per quanto riguarda la ricezione fissa il ricevitore convenzionale è limitato a 17 Mbit/s (16QAM-5/6) per una "buona" copertura, mentre il ricevitore CD3-OFDM consente di operare con tutte le configurazioni dello standard DVB-T anche in condizioni critiche di ricezione.

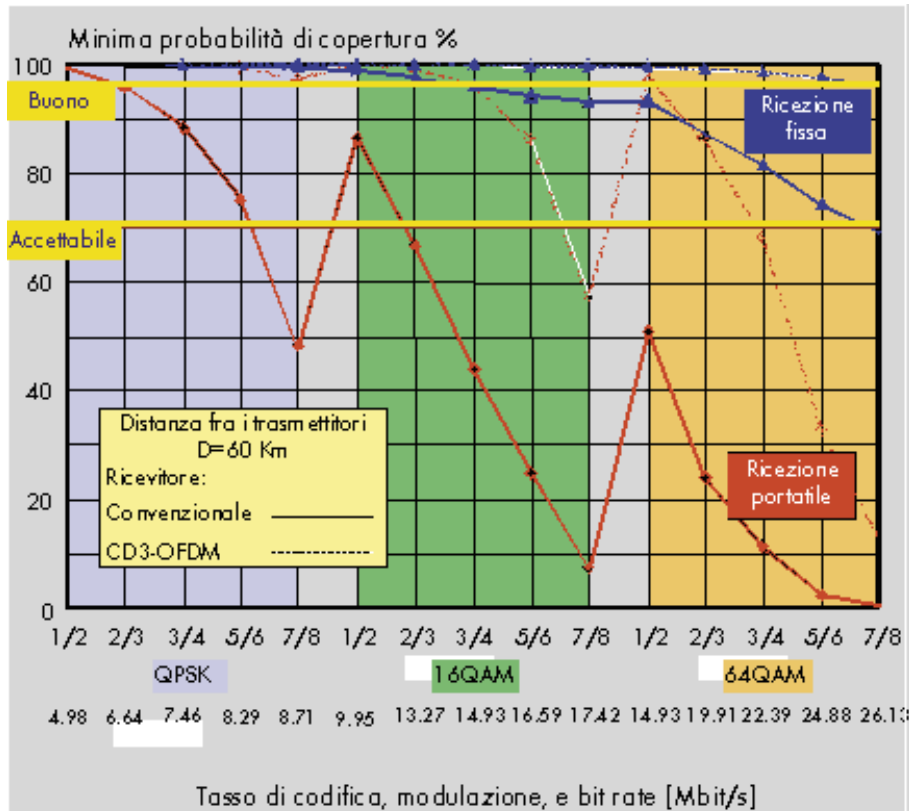



Fig. 5 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore CD3-OFDM paragonata a quella ottenibile con un ricevitore convenzionale.

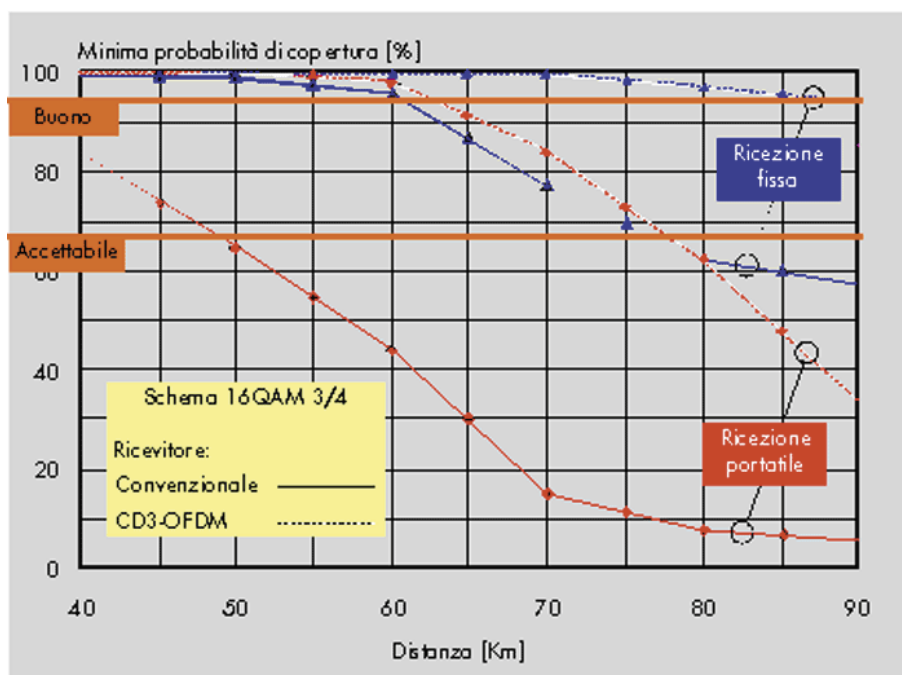
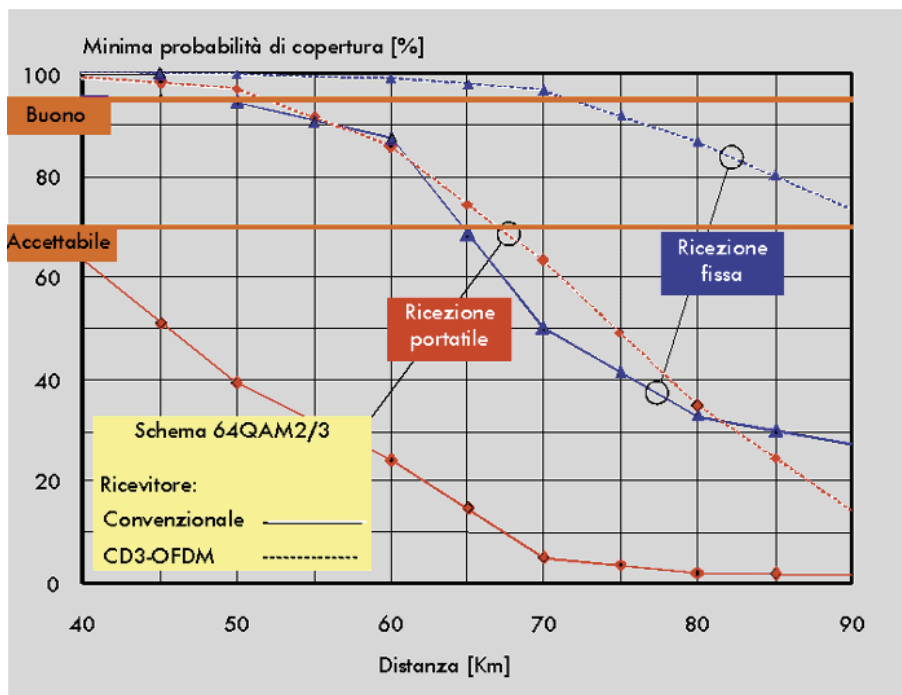
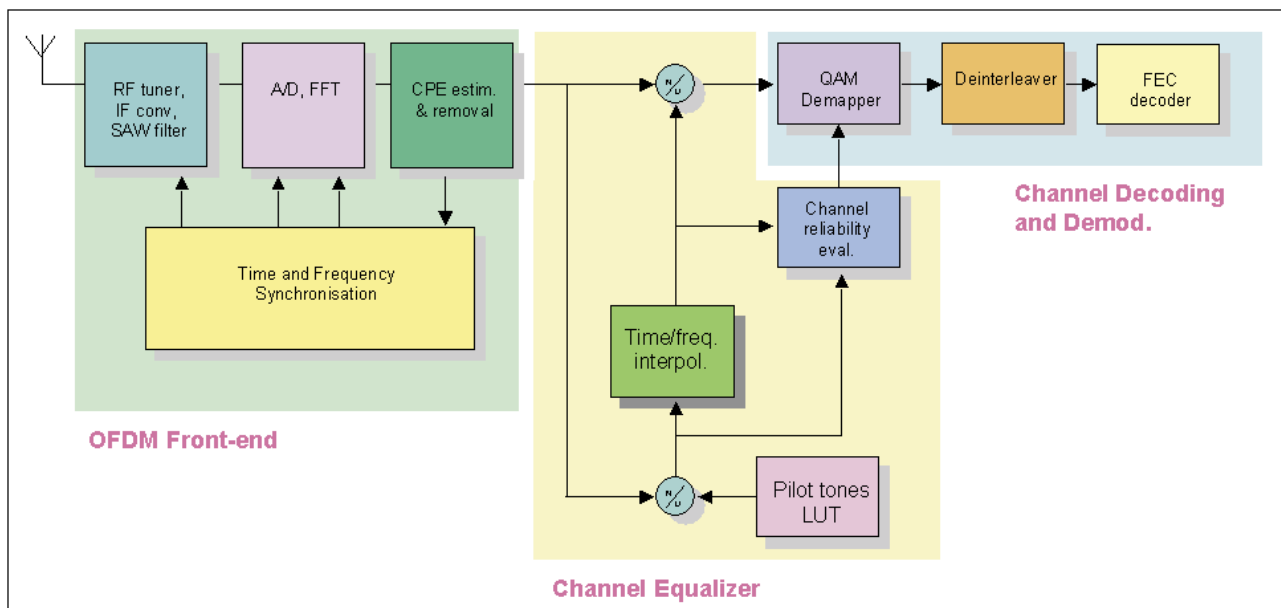



Fig. 6 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 16QAM 3/4 (Bit rate Ru = 15 Mbit/s)

Fig. 7 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 64QAM 2/3 (Bit rate Ru = 20 Mbit/s).

Nelle figura 6 e 7 è invece analizzato, rispettivamente, il comportamento del ricevitore convenzionale e CD3-OFDM per gli schemi 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-2/3 (20 Mbit/s), al variare della distanza tra i trasmettitori della rete. I risultati indicano che il sistema CD3-OFDM permette di aumentare del 20¸50 % la distanza tra i trasmettitori della rete, a parità di copertura percentuale. Per esempio in figura 6 si può vedere come il ricevitore CD3-OFDM garantisca una buona copertura a 15 Mbit/s (16QAM 3/4) con una distanza tra i trasmettitori adiacenti di circa 60 Km, mentre con ricevitori convenzionale al massimo si può arrivare a 35 km. Analogamente in figura 7, relativa al 64 QAM-2/3 (20 Mbit/s) si passa da 72 km per una buona copertura con il CD3-OFDM a 50 km per i ricevitori convenzionali. Dato che il quadrato della distanza è inversamente proporzionale al numero di trasmettitori nella rete (per reti regolari molto grandi), si può dedurre come ricevitori di tipo CD3-OFDM potenzialmente permettano, tenendo conto delle sole autointerferenze di rete, di ridurre alla metà o addirittura ad un terzo il numero di trasmettitori nella rete SFN rispetto ai ricevitori DVB-T convenzionali, a parità di area di copertura.

Sono state effettuate ulteriori simulazioni in presenza di rumore, verificando che il guadagno dato dal CD3-OFDM si mantiene fintanto che la potenza non diventa il limite alla copertura del servizio.

Fig. 8 - Struttura di un ricevitore DVB-T convenzionale

5. Implementazione hardware del ricevitore CD3-OFDM

L'algoritmo di stima di canale CD3-OFDM è stato realizzato in hardware come prototipo sperimentale, mediante componenti FPGA e DSP; la scheda CD3-OFDM è stata interfacciata al dimostratore europeo dTTb [13] (il primo ricevitore a standard DVB-T), sostituendo l'equalizzatore esistente. La configurazione implementata ha un filtro nel dominio della frequenza con una "banda" $T_f/T_u= 2T_g/T_u$ ed un filtro nel dominio del tempo, mediato su due simboli successivi.

Le prove di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM prototipale hanno verificato la validità dei risultati delle simulazioni riguardanti il degradamento graduale con echi aventi ritardo superiore alla durata dell'intervallo di guardia ed in presenza di effetto Doppler.

5.1 Architettura del ricevitore CD3-OFDM

Il ricevitore DVB-T convenzionale è schematizzato in figura 8. La prima sezione, indicata come "OFDM front-end", comprende tutte le funzioni di conversione del segnale ricevuto dall'antenna al simbolo OFDM (dopo FFT).

La sezione seguente, "Channel Equaliser", stima la risposta del canale tramite una divisione complessa fra le portanti pilota in arrivo e quelle memorizzate in una tabella ("*Look up table*", LUT) ed esegue un'interpolazione tempo-frequenza del risultato. Il divisore complesso in alto nella figura è l'equalizzatore che ha il compito di ripristinare ampiezze e fasi di tutte le costellazioni OFDM. Un ulteriore blocco effettua la stima dell'affidabilità del canale, utilizzata per ottimizzare le prestazioni della decodifica di Viterbi, stimando il rapporto segnale rumore C/N su ciascuna portante. C è sostanzialmente il modulo al quadrato della risposta del canale; la stima di N richiede, frequenza per frequenza, una media a lungo termine di rumore e interferenze. Siccome la componente N può essere estratta solo se noto il segnale trasmesso, questa operazione è fatta solo sulle portanti pilota e il risultato è interpolato nel dominio della frequenza per ricostruire i campioni mancanti.

L'ultimo blocco è il demodulatore con relativo decodificatore di canale, alimentato dai vettori equalizzati e dai coefficienti della stima dell'affidabilità del canale. Tali segnali sono utilizzati per calcolare le metriche all'interno dell'algoritmo di Viterbi.

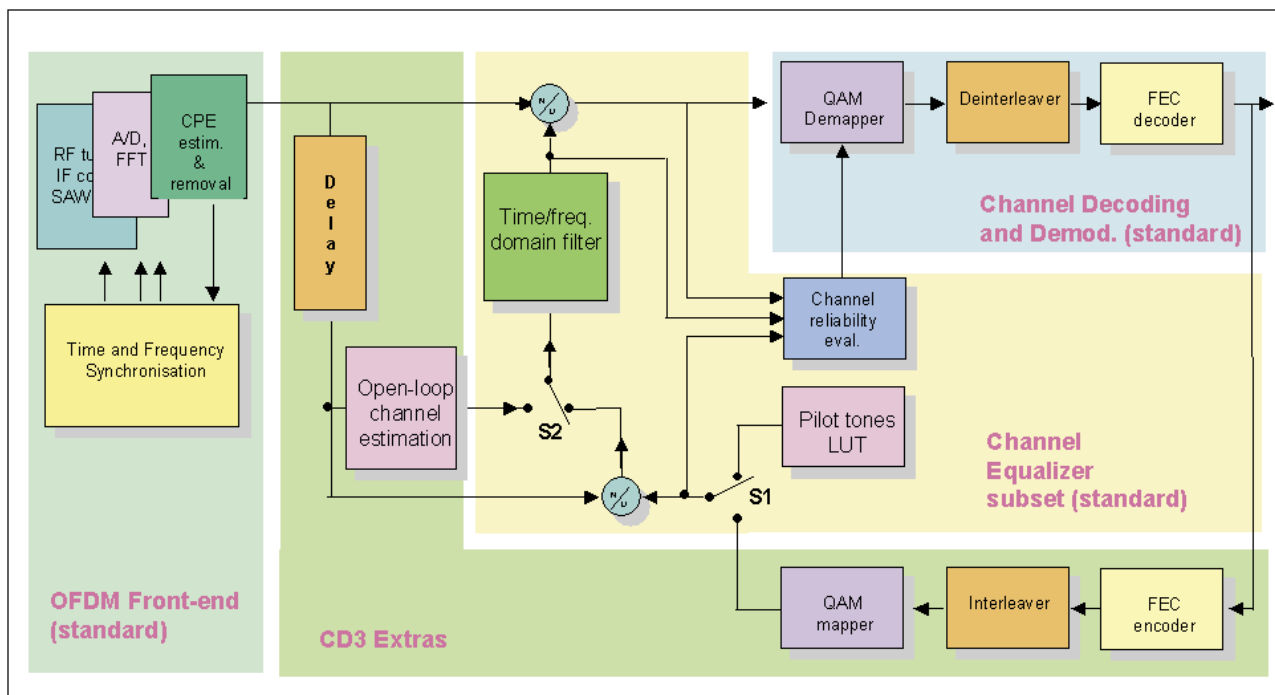



Fig. 9 - Struttura del ricevitore CD3-DVB-T

L'architettura del ricevitore CD3 può essere vista come l'estensione del ricevitore convenzionale come si può facilmente verificare in figura 9. La prima sezione ("OFDM front end") e l'ultima ("Channel Decoding and Demodulation") sono identiche a quelle del ricevitore convenzionale.

L'equalizzatore di canale è costituito dai medesimi blocchi funzionali, benché essi siano usati in modo leggermente diverso.

L'introduzione del CD3-OFDM richiede l'inserimento d'alcuni nuovi blocchi hardware. Nel ramo di reazione, il "FEC encoder" e il "QAM mapper" sono costituiti da semplice logica combinatoria e sequenziale. L'"Interleaver" richiede una memoria di simbolo oltre ad una logica di generazione degli indirizzi. Questo blocco è simile al Deinterleaver che precede il FEC Decoder ma più semplice poiché ogni posizione di memoria è costituita da soli tre bit anziché nove (parallelismo 3). Il blocco "Delay" è una memoria di simbolo di tipo FIFO a 24 bit. Il blocco "Open-loop Channel estimation" [15] richiede una memoria di simbolo di tipo FIFO per calcolare la media. Il parallelismo adottato è di 22 bit per asse. Sono inoltre necessari blocchi in grado di svolgere operazioni aritmetiche (accumulatori, tabelle, ecc.).

La velocità di calcolo necessaria è analoga a quella del ricevitore convenzionale. L'equalizzazione del simbolo n è basata sulla stima della risposta del canale effettuata sul simbolo n-1. Tutte le operazioni sono eseguite ad una frequenza di clock di 18 MHz eccetto quelle riguardanti il Viterbi decoder seriale operante a 36 MHz. Benché questa velocità sia facilmente ottenibile dall'attuale tecnologia, il funzionamento a frequenze inferiori (ad esempio la metà) è anche possibile ma a costo di una minor velocità d'adattamento al canale tempo-variante. Nel prototipo, è stata adottata la massima velocità d'anello, per rendere massime le prestazioni in presenza di Doppler shift.

In linea di principio sarebbe anche possibile scegliere l'approccio inverso, aumentando la velocità del clock e diminuendo le risorse hardware; di fatto tale soluzione non è conveniente essendo il costo dell'hardware aggiuntivo irrisorio.

5.2 Test di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM

Misure in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM prototipale sono state valutate nei laboratori Rai-CRIT utilizzando il simulatore di canale (Multipath Channel Simulator), con e senza l'aggiunta di rumore gaussiano additivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise). Il simulatore di canale utilizzato permette di inserire echi con ritardo fino a 2 x 190 μs (circa 1,7T_g). Non è stato possibile quindi estendere la prova fino al limite teorico di 2 T_g. Durante i test sono stati monitorati lo spettro, la costellazione e la risposta in frequenza del canale.

Le prestazioni del ricevitore CD3 sono state confrontate con un ricevitore convenzionale di classe professionale ottenendo i seguenti risultati:

- Su canale AWGN, per raggiungere un BER dopo decodifica di Viterbi pari a $2 \cdot 10^{-4}$, il prototipo CD3-OFDM richiede 18,8 dB di C/N contro i 19,4 dB richiesti dal ricevitore convenzionale. Questo leggero miglioramento (0,6 dB) è dovuto al miglior filtraggio della stima di canale nel dominio del tempo consentito dall'algoritmo CD3;
- Sommando un singolo eco con ritardo eccedente l'intervallo di guardia ($\tau \in [T_g, 2T_g]$), il CD3-OFDM ha dimostrato un degradamento graduale secondo quanto previsto dalla teoria. La figura 10 confronta le prestazioni del prototipo CD3-OFDM con quelle del ricevitore convenzionale in termini di C/I dell'eco per ottenere un BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi senza rumore. Nella regione da 1,2 T_g (270 μs) a 1,5 T_g (340 μs), il guadagno del CD3-OFDM, in termini di rapporti di protezione, è dell'ordine di 9-10 dB, e a 1,7 T_g (380 μs) è di circa 7 dB.

Misure in presenza di scostamenti Doppler

Dal momento che il CD3-OFDM è stato principalmente ideato per migliorare la probabilità di corretta ricezione portatile e fissa in SFN, solo il modo 8k, 64QAM 2/3 con intervallo di guardia Tg=1/4Tu è stato implementato nel prototipo. Ovviamente questo modo non è adatto per la ricezione mobile [2], [15], tuttavia sono state fatte delle prove comparative con il ricevitore convenzionale per estrapolare delle indicazioni inerenti al comportamento del CD3-OFDM in ricezione mobile.

Il sistema è stato testato con i seguenti profili di canale con echi:

Eco singolo:

- Ritardo τ=0 per il segnale principale, 0.9T_g per l'eco;
- Scostamento Doppler: 0 per il segnale principale, 2f_d per l'eco;
- Attenuazione dell'eco rispetto al segnale principale: 0, 3, 5 and 10 dB;

Echi multipli:

- Ritardi: τ=0 per il segnale principale, T_g/4, T_g/3, 2T_g/3, per gli echi;
- Scostamento Doppler: +f_d per il segnale principale, -f_d, +f_d, -f_d per gli echi;
- Attenuazione degli echi rispetto al segnale principale pari a 4,77, 8.77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 4 dB) and 14.77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 10 dB).

Lo scopo di questi profili è la valutazione del degradamento delle prestazioni dovute esclusivamente all'effetto Doppler, senza il contributo del fading piatto.

Definendo come C/I il rapporto fra la potenza del raggio principale e la somma della potenza di tutti gli altri echi, i risultati sui profili utilizzati

Fig. 10 - Eco singolo fuori dall'intervallo di guardia: $2 \cdot 10^{-4}$: degradamento graduale delle prestazioni del prototipo CD3-OFDM rispetto al rapido degradamento del ricevitore convenzionale

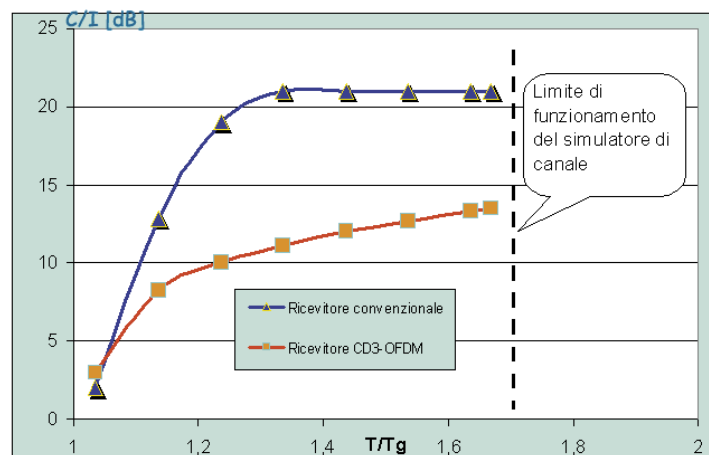
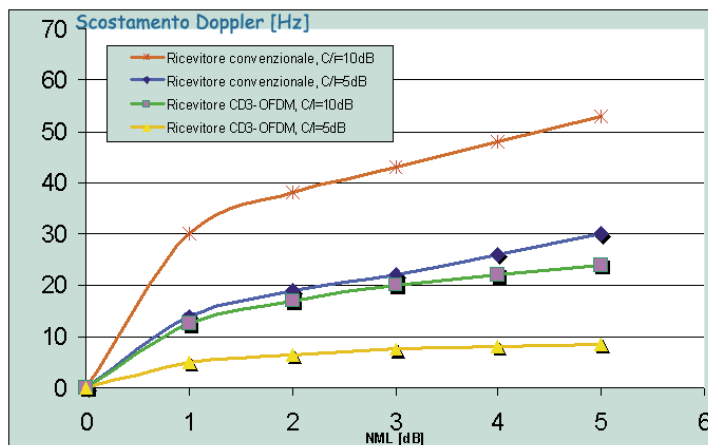



Fig. 11 - Scostamento Doppler che causa un dato NML (profilo con eco singolo)

hanno fornito il massimo scostamento Doppler accettabile per un dato degradamento delle prestazioni (NML, *Noise Margin Loss*). La soglia utilizzata è un BER dopo decodifica di Viterbi di 2×10^{-4}, corrispondente al livello QEF all'uscita del demultiplatore MPEG-2.

In figura 11 sono riportati i risultati per il caso di canale con eco singolo affetto da scostamento Doppler. Si è considerato il comportamento a regime del ricevitore CD3-OFDM, dopo la fase di aggancio. Come si può vedere dalla figura, il ricevitore CD3-OFDM sopporta approssimativamente uno scostamento Doppler dimezzato rispetto a quello permesso dal ricevitore convenzionale, dovuto alla presenza del filtro temporale, che media su due campioni consecutivi. A titolo di esempio, si considerano il canale 66 (834 MHz) ed il canale 28 (530 MHz), utilizzati attualmente da Rai-CRIT per la sperimentazione DVB-T a Torino. Accettando un degradamento di 1 dB, in presenza di un rapporto C/I di 10 dB il ricevitore convenzionale può funzionare fino a quasi 40 Km/h sul canale 66 e 61 sul canale 28, mentre il ricevitore CD3-OFDM può arrivare a soli 16 Km/h e 25 rispettivamente. Se il rapporto C/I scende a 5 dB, la massima velocità accettata scende a circa 17 Km/h sul canale 66 e 27 sul canale 28 per il ricevitore convenzionale e a 7 e 10 rispettivamente per il ricevitore CD3-OFDM.

In tutti gli altri casi (echi multipli affetti da scostamento Doppler), si è verificato un comportamento analogo [15].

6. Conclusioni

Attraverso l'invenzione del sistema di equalizzazione CD3-OFDM e la sua applicazione ai ricevitori DVB-T, Rai-CRIT ha dato un importante contributo alla definizione dello standard per la televisione digitale terrestre, offrendo la possibilità di garantire la copertura del servizio in SFN anche in aree critiche, in presenza di echi a potenza elevata che cadono fuori dall'intervallo di guardia.

Il procedimento CD3-OFDM per la stima della funzione di trasferimento del canale, valutato sia attraverso simulazioni al calcolatore che in laboratorio mediante il prototipo di ricevitore sviluppato dal Centro Ricerche della Rai, offre prestazioni analoghe ai ricevitori convenzionali DVB-T in presenza di soli echi che cadono all'interno dell'intervallo di guardia; per contro, offre benefici in termini di qualità del servizio in presenza di echi esterni all'intervallo di guardia. Diventa pertanto possibile la realizzazione di reti SFN a larga copertura (ad es. regionale o nazionale) senza dover incrementare significativamente il numero dei trasmettitori rispetto alla situazione dell'attuale servizio televisivo analogico, garantendo allo stesso tempo una elevata qualità del servizio.

Il prototipo hardware del ricevitore CD3-OFDM ha inoltre permesso una verifica comparativa della complessità dell'algoritmo di equalizzazione CD3-OFDM rispetto alle tecniche comunemente impiegate nei ricevitori convenzionali, ritenendola paragonabile, sia in termini delle velocità richieste, che in termini di memoria, senza aggravi sul costo del ricevitore d'utente.

I vantaggi della soluzione CD3-OFDM sono ottenibili con lo sviluppo di ricevitori commerciali DVB-T che includono tale algoritmo, senza tuttavia che si richiedano modifiche allo standard di trasmissione. L'opportunità offerta all'industria del settore e agli operatori di rete potrebbe costituire un importante incentivo nello sviluppo della televisione digitale terrestre, con particolare attenzione alle reti isofrequenziali a larga copertura.

Bibliografia

1. ETSI EN 300 744, " Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", http://www.etsi.org

2. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin, "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

3. M. Cominetti: "La televisione digitale terrestre: un'opportunità per il nostro paese", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

4. ATSC Standard A/53 (1995), "ATSC Digital Television Standard", http://www.atsc.org/standards/a_53b.pdf

5. S.B.Weinstein, and P.M. Ebert: "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform", IEEE Transaction on Communications, COM-19(5), p.628-634, October 1971

6. Cimini, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transaction on Communications, COM-33, p.665-675, July 1985

7. M. Alard, R. Lassalle: "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers", EBU Technical Review, n.224, p.168-190, August 1987

8. ETSI EN 300 401, "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", http://www.etsi.org

9. V. Mignone, A. Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", IEEE Transactions on Communications, COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996

10. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "CD3-OFDM: A new channel estimation method to improve the spectrum efficiency in digital terrestrial television systems", IBC'95, Amsterdam, 14-18 September, 1995

11. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Advanced algorithm for improving DVB-T coverage in SFN", IBC'97, Amsterdam

12. A. Morello, G. Blanchietti, C. Benzi, B. Sacco, M. Tabone "Performance assessment of a DVB-T television system", Montreux Symposium, 1997.

13. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone, "Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1, 2002

Glossario	
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CD3-OFDM	Coded Decision Directed Demodulation-OFDM
DAB	Digital Audio Broadcasting
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	DVB-Terrestrial
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FIFO	First In First Out
ISI	InterSymbol Interference
LUT	Look Up Table
NML	Noise Margin Loss
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QEF	Quasi Error Free
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
SFN	Single Frequency Network

14. European Broadcasting Union – “Terrestrial Digital Television planning and implementation considerations”, BNP 005 Second Issue, 1997.

15. A. Morello, B. Sacco, “Hardware architecture and laboratory test on an advanced CD3 DVB-T receiver”, IBC’99, Amsterdam.

Appendice A
I principi della demodulazione CD3-OFDM

Supponendo che il simbolo OFDM trasmesso al tempo n-1 sia noto, la funzione di trasferimento del canale di trasmissione potrà essere calcolata come rapporto tra il segnale ricevuto y(n-1,k) ed il segnale trasmesso x(n-1,k):

$$\begin{aligned}\hat{\underline{H}}(n-1,k) &= \underline{y}(n-1,k)/\underline{x}(n-1,k)\\ &= \underline{H}(n-1,k)+\underline{g}(n-1,k)\end{aligned} \quad (1)$$

dove $\underline{g}(n-1,k) = \underline{n}(n-1,k)/\underline{x}(n-1,k)$

rappresenta una componente di rumore gaussiano, che dipende anche dall’ampiezza del segnale trasmesso x(n-1,k).

Nell’ipotesi che la funzione di trasferimento del canale

sia quasi-stazionaria tra i due simboli n-1 e n, il simbolo successivo n potrà essere così equalizzato:

$$\begin{aligned}\underline{z}(n,k) &= \underline{y}(n,k)/\hat{\underline{H}}(n-1,k)\\ &\approx \underline{x}(n,k)+\underline{\nu}(n,k)\end{aligned} \quad (2)$$

La stima z(n,k) sarà affetta, come nella demodulazione differenziale[Nota 6], da un degradamento delle prestazioni di 3 dB rispetto alla demodulazione ideale, con riferimento non affetto da rumore. Ciò in quanto i campioni della stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{\underline{H}}(n,k)$ sono altrettanto rumorosi del segnale y(n-1,k). Per ridurre il contributo di rumore sulla stima è però possibile introdurre un filtraggio in frequenza sulla stima di

$\hat{\underline{H}}(n,k)$ accettando una riduzione del cosiddetto intervallo di corretta equalizzazione Tf [2], che, essendo $\hat{\underline{H}}(n,k)$ campionata con frequenza unitaria (la funzione è disponibile per ogni posizione delle portanti, dati e pilota), si estende per il ricevitore CD3-OFDM in assenza di filtraggio a tutta la durata della porzione utile del simbolo OFDM Tu. Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo (tenendo conto delle limitazioni che ciò impone alla capacità di inseguire le variazioni del canale) potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

L’algoritmo CD3-OFDM originariamente proposto in [9] e [10] si basa sulla ritrasmissione periodica di un simbolo OFDM di riferimento per iniziare il processo di equalizzazione, che si riassume nei seguenti passi (figura 1):

1. Ricezione della sequenza di riferimento x(n=1,k);
2. Stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{\underline{H}}(n=1,$ secondo la formula (1);
3. Filtraggio di $\hat{\underline{x}}(n,k)$ nel dominio della frequenza e del tempo;
4. Equalizzazione del simbolo C-OFDM al passo n mediante la formula (2);
5. Stima della sequenza trasmessa attraverso demodulazione e decodifica della sequenza z(n,k), e successiva ricodifica e rimodulazione per generare $\hat{\underline{x}}(n,k)$;
6. Ripetizione simbolo per simbolo del procedimento a partire dal passo 2, utilizzando come sequenza di riferimento la sequenza stimata al passo precedente $\hat{\underline{x}}(n,k)$.

Il procedimento CD3-OFDM rende inutile la trasmissione di portanti note all’interno del

Nota 6.
Da notare che questo metodo non è limitato alle costellazioni con simmetria rotazionale, come la demodulazione differenziale, ma è applicabile ad ogni costellazione.

simbolo OFDM, purché sia periodicamente trasmesso un simbolo noto per iniziare il processo di demodulazione CD3-OFDM. La stima della funzione di trasferimento del canale viene effettuata ad ogni simbolo OFDM, per essere applicata al simbolo successivo, permettendo una velocità di inseguimento del canale equivalente a quella dei sistemi differenziali.

Accorgimenti implementativi

Per le modulazioni ad inviluppo non costante, come il 16QAM ed il 64QAM, il livello del rumore $\underline{\varepsilon}(n,k)$ associato alla stima del canale cambia significativamente da campione a campione, introducendo un degradamento sulle prestazioni del sistema. Per ridurlo, quando la portante k-esima trasporta uno degli L punti più interni della costellazione, la k-esima posizione di $\hat{H}(n,k)$ viene mantenuta al valore stimato al simbolo precedente.

Il demodulatore CD3-OFDM potrebbe diventare instabile per alte probabilità d'errore sul canale, in quanto gli errori non corretti rientrano nell'anello di stima. Questo effetto è normalmente neutralizzato fino a probabilità d'errore molto elevate, grazie alla presenza di codici correttori potenti e al filtraggio della funzione $\underline{\hat{H}}(n,k)$, che attenua i picchi dovuti agli errori residui nell'anello di retroazione. La presenza poi di un interallacciatore di frequenza con regola di sparpagliamento delle portanti diversa per simboli consecutivi, permette di spezzare le lunghe sequenze d'errore all'uscita del decodificatore di Viterbi, ulteriormente aumentandone le capacità correttive.

Appendice B: L'algoritmo CD3-OFDM applicato ai ricevitori DVB-T

Il sistema DVB-T non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento. Poiché in tale caso l'algoritmo CD3-OFDM originario non è in grado di iniziare il processo di stima, si è sviluppato un algoritmo di aggancio basato sulle portanti pilota trasmesse nel segnale DVB-T [11] e suddiviso nelle seguenti due fasi consecutive:

Fase 1. Si tenta un aggancio veloce (entro 4 simboli OFDM) dell'anello di stima CD3-OFDM mediante la stima convenzionale $\underline{\hat{H}}_P(n,k)$ della funzione di trasferimento del canale prevista dal sistema DVB-T, sulla base alle portati pilota sparse (con banda del filtro interpolatore $T'_f/T_u = T_g/T_u$). Nel caso di echi fuori dall'intervallo di guardia poco potenti l'anello raggiunge la stabilità e la demodulazione CD3-OFDM può continuare; in caso contrario si prosegue con la Fase 2.

Fase 2. L'ampiezza e la fase della funzione di trasferimento corrispondente alle portanti dati sono calcolate applicando una non-linearità (ad esempio elevazione alla quarta potenza) ed un filtro nel dominio del tempo (ad esempio la funzione media) su N simbolo OFDM consecutivi. L'ambiguità di fase di multipli di p/2, dovuta alla simmetria delle costellazioni M-QAM, viene risolta adottando portante per portante la fase più vicina a quella della stima ottenuta nella Fase 1 [Nota 7]. Introducendo poi un filtro in frequenza con banda T_f/T_u uguale, ad esempio, a $2T_g/T_u$, si ottiene una stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{H}_D(n,k)$ con cui è possibile equalizzare correttamente tutti gli echi fino a ritardo pari a due volte l'intervallo di guardia. Questa fase permette un aggancio lento del procedimento CD3-OFDM (necessita di alcune decine di simboli OFDM), per cui può essere applicata solo nel caso di canale quasi-statico per tutta la durata del periodo di aggancio.

Nota 7. Si ipotizza che gli echi fuori dall'intervallo di guardia siano limitati in ampiezza (attenuati di almeno 3-4 dB), e producano quindi rotazioni di fase addizionale piccole (< p/4) rispetto a quelle introdotte dagli echi minori dell'intervallo di guardia (stimate nella Fase 1).

Sistemi di comunicazione convergenti: DVB-T e reti cellulari di terza generazione

ing. Paolo **Casagranda,**
ing. Vittoria **Mignone,**
ing. Davide **Milanesio,**
ing. Paola **Sunna** e
dr. Luca **Vignaroli**
Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario
La rete diffusiva digitale DVB-T e la rete cellulare di terza generazione UMTS rappresentano, ciascuna nel proprio ambito, le tecnologie di comunicazione terrestre più evolute operanti attualmente. La possibilità di cooperazione di questi due standard, al fine di migliorare il servizio e diminuire i costi, è stata oggetto di studio negli ultimi anni da parte di progetti europei e gruppi di standardizzazione internazionali. L'articolo descrive il lavoro svolto e le conclusioni raggiunte nei progetti di ricerca OverDRiVE e CISMUNDUS e nei gruppi di standardizzazione DVB-UMTS e DVB-X.

1. Introduzione

Prima dell'avvento delle tecnologie digitali, televisione e telefonia erano considerati mondi distinti: l'uno caratterizzato dalla diffusione di segnali audio/video/dati comuni a tutti gli utenti, l'altro da collegamenti audio e dati bi-direzionali personalizzati per il singolo utente.

Nei sistemi radio, quali la diffusione televisiva via satellite e terrestre e la telefonia mobile, queste differenze hanno portato alla realizzazione di strutture di rete molto differenti, per rispettare criteri di ottimizzazione delle risorse di potenza e di occupazione di banda con obiettivi diversi. Attualmente le reti di diffusione terrestri radiofoniche e televisive usano trasmettitori di potenza elevata che coprono aree di servizio molto vaste (ad esempio regioni o nazioni). Il costo di rete suddiviso per utente risulta essere generalmente basso (dell'ordine di poche decine di Euro per famiglia all'anno nell'ipotesi di servire decine di milioni di terminali d'utente), ed un aumento del numero di utenti e ricevitori all'interno della zona di copertura non implica un aumento del costo di rete. Al contrario le reti di telecomunicazioni mobili, per migliorare l'utilizzo della banda disponibile, impiegano trasmettitori a bassa potenza con copertura su celle molto piccole: infatti, più alto è il traffico interattivo che la rete deve gestire, più piccola risulta la dimensione che le celle devono avere. Il costo di una rete di telecomunicazioni cellulare è generalmente alto e un aumento di traffico implica costi supplementari per la rete. Le differenze, quindi, sono notevoli sia in ambito normativo sia nella concessione delle licenze.

La convergenza è iniziata con l'introduzione dei sistemi digitali, la cui maggiore flessibilità ha permesso di offrire agli utenti nuovi servizi basati sulla cooperazione tra il mondo telecom e broadcast. Ad esempio, tramite i sistemi di diffusione televisiva digitale via satellite (DVB-S), terrestre (DVB-T) e via cavo (DVB-C) sviluppati dal progetto DVB (Digital Video Broadcasting) è possibile fruire di servizi di web-casting, super-teletext, TV interattiva (tele-voto, pubblicità interattiva) e persino accesso ad Internet e commercio elettronico sul televisore collegato alle reti telecom per il canale di ritorno. In quest'ottica il DVB ha sviluppato negli anni passati normative per l'integrazione tra i sistemi di diffusione digitale ed i sistemi telecom per collegamenti interattivi (via PSTN, GSM, UMTS, ecc.), favorendo l'evoluzione del concetto di diffusione televisiva verso l'inclusione dell'interattività.

Analogamente il passaggio al digitale nei sistemi di telefonia cellulare di seconda generazione (GSM, GPRS) ha permesso di sviluppare protocolli adatti alla trasmissione e ricezione di immagini e brevi filmati sul telefonino. Il sistema di terza generazione UMTS poi è stato progettato per offrire all'utente mobile la possibilità di utilizzare il telefonino UMTS oltre che per i servizi vocali convenzionali anche

per accedere a servizi audio/video a richiesta e ad Internet, grazie alla maggiore capacità trasmissiva rispetto ai sistemi di seconda generazione.

Per poter sfruttare appieno le potenzialità dei nuovi sistemi digitali offrendo sempre nuovi servizi agli utenti e nuove opportunità di business agli operatori broadcast e telecom, negli ultimi anni sono nati molti progetti di studio per realizzare la convergenza tra i servizi diffusivi televisivi e la telefonia mobile di seconda e terza generazione, con l'obiettivo di permettere un'integrazione ottimale delle risorse di rete. In particolare si sta dedicando grande attenzione ai nuovi sistemi terrestri wireless: il sistema di diffusione televisiva DVB-T ed il sistema cellulare di terza generazione UMTS.

Che vantaggi possono essere ravvisati dalla cooperazione di una tecnologia diffusiva e di una cellulare? Innanzitutto i vantaggi per gli utenti. Gli utenti sono interessati ai servizi offerti piuttosto che alla tecnologia che li abilita, e una maggiore integrazione tra DVB-T e UMTS permetterebbe di fornire ad essi i servizi richiesti in modo più semplice. Anche la qualità di alcuni servizi esistenti potrebbe trarne beneficio, ad esempio per la disponibilità del servizio quando le reti siano utilizzate in modo complementare (in caso di mancanza di copertura DVB-T, UMTS fornisce parte dei servizi; e viceversa). In secondo luogo, i servizi attualmente disponibili potrebbero essere migliorati: ad esempio, un servizio diffusivo presenta tipicamente contenuti adatti ad un ampio target di utenti; la rete cellulare aprirebbe la strada a contenuti specifici. La cooperazione darebbe luogo a servizi multimediali innovativi, come stanno ora dimostrando, ad esempio, i progetti europei OverDRiVE e CISMUNDUS. Infine, l'efficienza d'utilizzo delle risorse di banda potrebbe migliorare, riducendo così i costi di distribuzione dei servizi.

La strada della cooperazione però non è affatto scontata. Le frequenze allocate per la televisione digitale sono una risorsa che difficilmente sarà condivisa con i gestori di telecomunicazioni; d'altra parte l'UMTS sembra legato a specifiche che non prendono in considerazione un'integrazione con la rete diffusiva per la creazione dei servizi. Ecco quindi lo sforzo di ricerca che è stato intrapreso da parte di gruppi di standardizzazione (DVB-UMTS, DVB-X) e di progetti di ricerca europei (fra cui CISMUNDUS e OverDRiVE).

2. Sistemi di comunicazione cellulare di terza generazione: DVB-UMTS

Il progetto DVB, nato con lo scopo di guidare l'introduzione delle tecnologie digitali nella diffusione televisiva, ha sempre basato le proprie scelte sull'evoluzione del mercato. Per partecipare attivamente al processo di convergenza attualmente in atto tra il broadcasting digitale e le telecomunicazioni mobili, nel Novembre 2000 ha creato il gruppo di lavoro *ad hoc* DVB-UMTS con il compito di delineare possibili scenari di collaborazione nel mondo wireless fra le tecnologie broadcast e telecom, evidenziando esigenze degli utenti e opportunità di business per l'industria e gli operatori e promuovendo la definizione di normative in grado di regolamentare la convergenza.

Il gruppo si è concentrato principalmente sullo studio dei sistemi terrestri, il sistema di diffusione televisiva digitale DVB-T [1] ed i sistemi di telefonia cellulare GPRS e UMTS. Sono state evidenziate peculiarità e limiti dei due sistemi, il primo in grado di trasportare alta capacità di traffico (fino a 10-15 Mbit/s per cella ad utenti mobili) unidirezionale in modalità broadcast, ma non adatto a trasmissioni unicast per la tipica struttura di rete costituita da celle molto grandi (macrocelle con raggio 50-100 km), il secondo progettato per gestire un traffico bidirezionale interattivo a capacità ridotta (al massimo 2 Mbit/s per cella) con struttura di rete a celle di piccole dimensioni (da qualche chilometro a poche centinaia di metri). I sistemi satellitari sono stati considerati a margine, come complemento ai sistemi terrestri per aumentare la copertura dei servizi, specialmente nelle zone a bassa densità di traffico.

Le possibili applicazioni e nuovi servizi derivanti dalla cooperazione tra reti telecom e

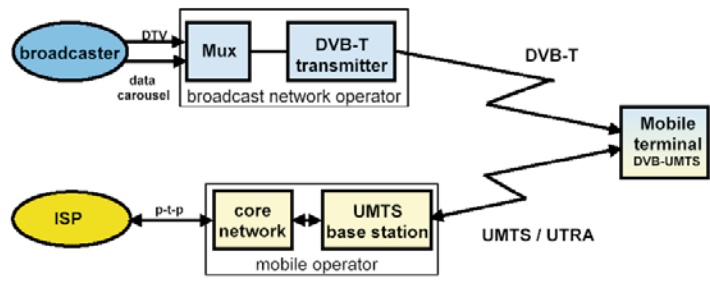
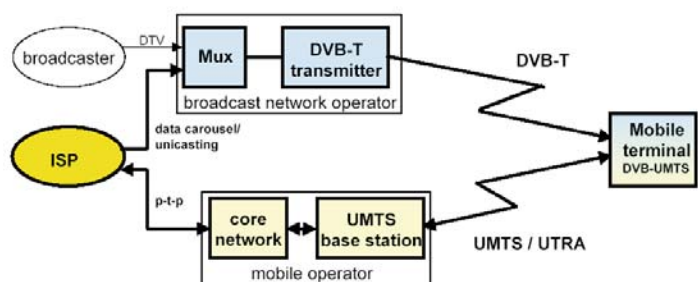
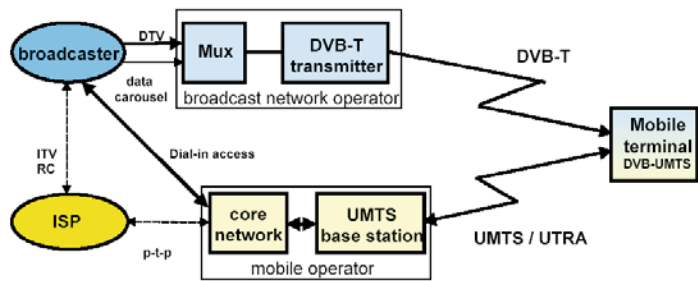
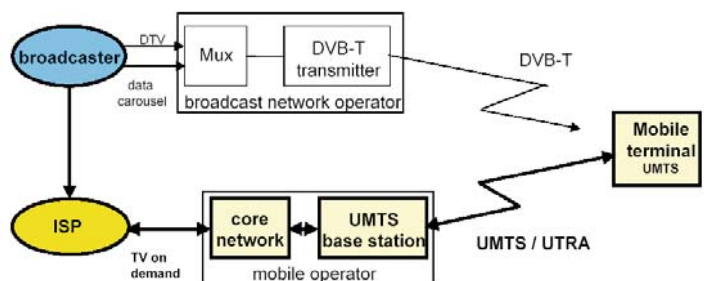
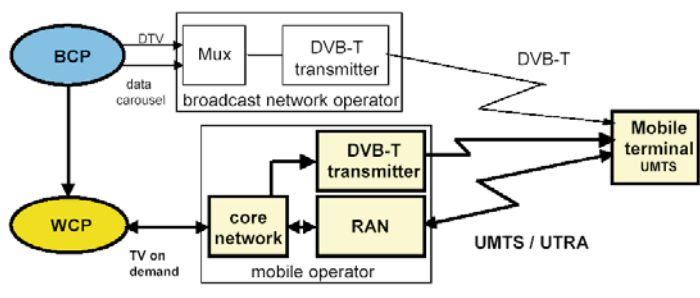
broadcast sono stati raggruppati in sette aree: informazione (per esempio navigazione in Internet, commercio interattivo, download di giornali e libri, informazioni turistiche), educazione (lezioni e corsi, consultazione di biblioteche, laboratori linguistici e scientifici), intrattenimento (TV, radio, giochi, musica o filmati a richiesta, scommesse), servizi telematici di navigazione stradale (informazioni di viaggio e sul traffico, diagnostica automobilistica a distanza, servizi per i mezzi pubblici come intrattenimento dei passeggeri, gestione di mezzi, guasti, emergenze), servizi di comunicazione (telefonia e videotelefonia, videoconferenza, messaggistica multimediale), affari (ufficio mobile, lavoro di gruppo virtuale, video-conferenza e download di file) e servizi speciali (tele-medicina, emergenze, monitoraggio).

Sulla base dei possibili nuovi servizi sono stati identificati cinque scenari, le cui architetture di rete sono rappresentate nelle figure seguenti.

Il primo scenario prevede l'integrazione solo a livello del terminale d'utente, equipaggiato di ricevitore DVB-T e ricetrasmettitore UMTS. Non si prevede alcun coordinamento a livello di rete ed è pertanto l'utente a dover scegliere a quale fornitore, broadcaster o gestore dei servizi interattivi, collegarsi per ottenere le informazioni richieste.

Nel secondo scenario si considera il caso in cui esista un fornitore di servizi interattivi che gestisce le reti DVB-T e UMTS/GPRS in modo coordinato.

Nel terzo scenario le reti UMTS/GPRS sono utilizzate come canale di ritorno per servizi di diffusione interattivi, e per l'invio di informazioni personalizzate ai singoli utenti.

Il quarto scenario ipotizza la possibilità di inviare contenuti DVB su reti UMTS/GPRS. Nonostante la capacità delle reti cellulari sia molto minore di quelle DVB, è possibile pensare ad una conversione dei contenuti per adattarli alle caratteristiche del canale ed alla modalità di fruizione del servizio (qualità, velocità di trasmissione, formato di codifica, etc.).

Scenario 1 - Integrazione a livello di terminale d'utente.

Scenario 2 - Servizi IP coordinati su reti UMTS e DVB.

Scenario 3 - UMTS come canale di ritorno per il sistema DVB.

Scenario 4 - Trasmissione di contenuti DVB attraverso l'UMTS.

Scenario 5 - DVB-T integrato nella rete dell'operatore mobile.

L'ultimo scenario rappresenta il caso in cui la tecnologia DVB-T viene utilizzata sulle reti UMTS/GPRS, per estendere la capacità del collegamento dal fornitore di servizi all'utente.

E' ora compito del gruppo valutare l'eventuale presenza di criticità, sia in termini di regolamentazione (la convergenza porta alla sovrapposizione tra i concetti di diffusione e comunicazione, che deve essere gestita), che in termini tecnici (caratteristiche dei terminali d'utente, limiti di batterie, schermi, interferenze in presenza di ricetrasmissione contemporanea DVB-T e GPRS/UMTS). Inoltre, il gruppo dovrà verificare l'adeguatezza delle normative esistenti e l'eventuale necessità di definire nuovi standard. Il risultato di questi studi sarà raccolto nel rapporto "The DVB Handbook on Digital Broadcast and Mobile Telcomms Co-operation".

3. OverDRiVE

Il Progetto Europeo OverDRiVE (Spectrum Efficient Uni- and Multicast Over Dynamic Radio Networks in Vehicular Environments) è nato da un consorzio di aziende[Nota 1] del settore della diffusione radiotelevisiva, delle telecomunicazioni e dell'industria automobilistica, nonché di centri di ricerca e Università Europee, con lo scopo di studiare e dimostrare l'utilizzo cooperativo di reti diffusive e cellulari (DVB-T, UMTS e WLAN) per la fornitura di servizi multimediali orientati all'utenza mobile, e si differenzia da altri progetti (tra cui CISMUNDUS, descritto in seguito) sotto vari aspetti prettamente tecnologici (tra cui Protocollo IP versione 6, multicast gerarchico, Dynamic Spectrum Allocation). L'utente potrà fruire, ad esempio, delle ultime notizie del TG oppure delle previsioni meteorologiche in qualsiasi momento, da casa o dalla propria automobile, avendo la possibilità di accedere ad un servizio a valore aggiunto e *cost-effective*, poiché le reti migliori vengono di volta in volta utilizzate. Se l'informazione è già disponibile sulla rete DVB-T non verrà richiesta alla rete UMTS; d'altra parte se l'utente è interessato ad un approfondimento della notizia appena ascoltata, la rete interattiva UMTS glielo renderà possibile. La natura punto-multipunto della rete DVB-T consente un aggiornamento in tempo reale di tutti gli utenti interessati; la natura cellulare della rete UMTS consente un'alta interattività e specificità delle informazioni richieste. In alcuni luoghi, ad esempio negli aeroporti o nelle stazioni ferroviarie, la presenza contemporanea di molti utenti che richiedono la stessa informazione (orari dei voli o indirizzi di alberghi e ristoranti) può rendere molto conveniente l'utilizzo di Wireless LAN.

Gli utenti potranno fruire degli stessi servizi anche durante un viaggio in auto o in treno, grazie all'utilizzo di reti che supportano il movimento, insieme all'innovativa tecnologia IPv6, in grado di gestire gli spostamenti nei terminali riceventi.

Un dimostratore completo dei concetti esposti verrà presentato ufficialmente presso Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica di Torino a Dicembre 2003.

Nota 1 - Fanno parte del Progetto OverDRiVE Rai Crit, Ericsson, DaimlerChrysler, France Télecom, Motorola, RWTH Aachen, l'Università di Bonn e l'Università del Surrey. Il progetto è iniziato nell'Aprile 2002 ed è finanziato dalla Information Society Technologies (IST, www.cordis.lu/ist).

Fig. 1 - Il logo del Progetto OverDRiVE.

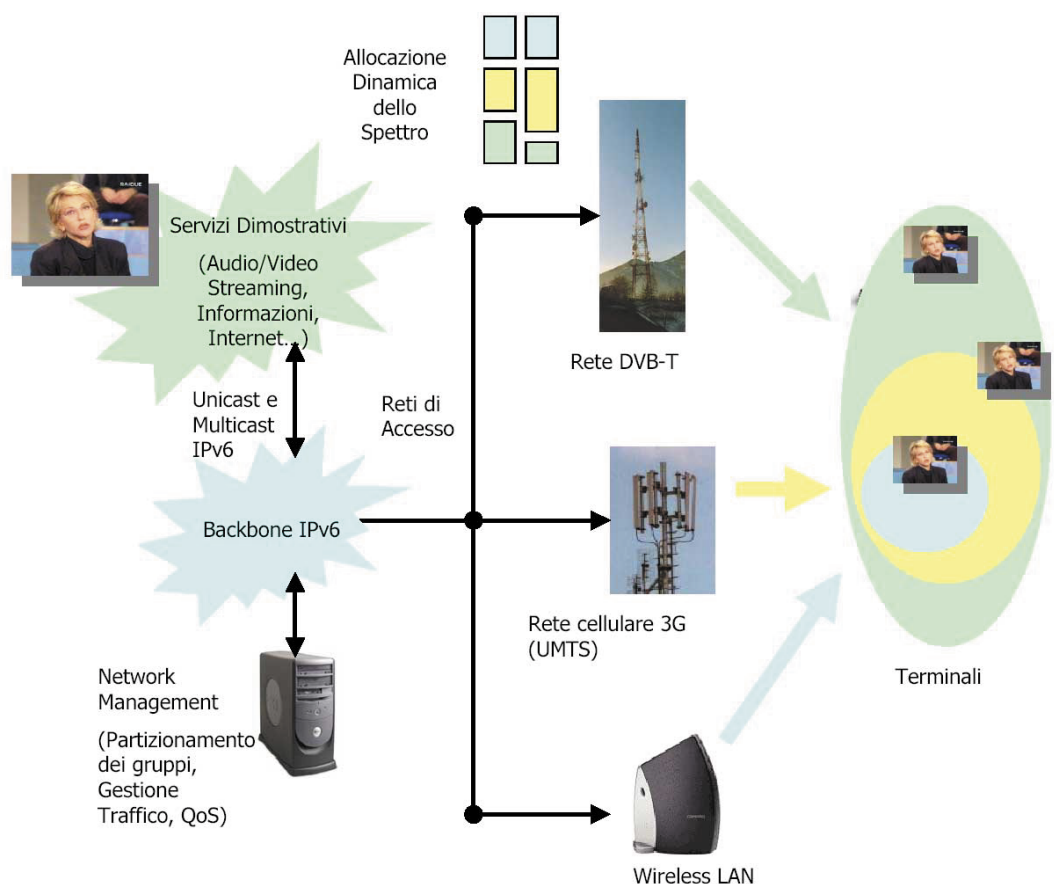



Fig. 2 - Schema essenziale dell'architettura del sistema definito da OverDRiVE.

3.1 Reti ibride ad elevata efficienza spettrale in OverDRiVE

OverDRiVE aspira a dimostrare servizi unicast e multicast[Nota 2] realizzati migliorando l'efficienza spettrale rispetto ai servizi tradizionali. Ciò viene realizzato utilizzando una rete ibrida, cioè che implichi l'utilizzo di reti diverse (diffusive e cellulari), per la fornitura del servizio e l'allocazione dinamica della banda in relazione al numero di interessati al servizio. Nel contesto del Progetto OverDRiVE [2] la rete ibrida è costituita dalle reti DVB-T, UMTS e WLAN. La rete DVB-T fornisce un'ampia copertura geografica, con celle di diversi km di diametro, e una banda relativamente larga (da 6 a 24Mbps tipicamente). La natura unidirezionale del DVB-T lo rende ideale a distribuire contenuti di interesse generale, indirizzati ad un target di utenti esteso. La rete UMTS, d'altro canto, rende possibile una comunicazione su celle con copertura geografica minore ma di natura bidirezionale, come anche la rete Wireless LAN, principalmente rivolta al traffico in zone relativamente affollate. E' la compresenza di tutte queste reti: diffusiva digitale, cellulare di terza generazione e WLAN, che permette di migliorare i servizi offerti all'utente.

L'infrastruttura di comunicazione che permette il funzionamento della rete ibrida è costituita dal protocollo IPv6 [3]. I contenuti dei servizi dimostrati da OverDRiVE sono trasportati utilizzando IPv6 in modalità unicast e multicast. IPv6 da questo punto di vista, oltre a fornire un banco di prova per questo protocollo in fase di sperimentazione avanzata[Nota 3], rende possibile unificare le parti di servizio trasmesse sulle diverse reti; idealmente per l'utente il tipo di rete utilizzata dovrebbe essere trasparente. In questa prospettiva risulta chiaro come la rete necessiti di una elevata "intelligenza": la

Nota 2 - Servizi che vengano forniti con indirizzamento di tipo punto-punto sono considerati unicast; servizi forniti su base punto-multipunto sono considerati multicast.

Nota 3 - Al momento della stesura dell'articolo, le estensioni per la gestione dei gruppi e il routing multicasting IPv6 sono ancora in fase di standardizzazione.

rete IPv6 deve creare in modo ottimale gruppi di utenti che richiedono gli stessi contenuti, e la rete di accesso radio deve gestire la banda disponibile in modo ottimale.

OverDRiVE ottimizza l'utilizzo delle risorse di banda indirizzando un altro problema: la riallocazione della banda disponibile. Ipotizzando di poter ridefinire l'utilizzo delle bande assegnate a DVB-T e UMTS, è possibile pensare di migliorare l'efficienza spettrale togliendo banda alla rete meno utile e fornendola alla rete più utile in un certo istante. Così, all'aumentare delle richieste di contenuti streaming audio/video in tempo reale, ad esempio, verrà sottratta una percentuale della banda utilizzata per i collegamenti UMTS punto-punto, banda assegnata alla rete diffusiva.

L'architettura definita da OverDRiVE, schematicamente riportata in figura 2, si articola in alcuni componenti principali, che riassumono anche i principali punti di impatto nella ricerca svolta da questo Progetto:

- protocolli di multicast mobile: IPv6 fornisce un supporto alla mobilità, consentendo ad un utente di spostarsi da una rete IP, conservando la connessione stabilita in origine
- management dei gruppi: la presenza di una rete ibrida e di gruppi di utenti con le stesse richieste rende importante organizzare gerarchicamente la distribuzione dei contenuti multicast
- supporto del multicast a livello di interfaccia radio: alcune interfacce radio supportano naturalmente il traffico punto-multipunto (es. DVB-T); altre, come UMTS, devono ancora essere migliorate
- mobilità della rete di comunicazioni intraveicolare: nel caso di un veicolo in movimento (auto, treno…) deve essere gestito lo spostamento di tutta la rete intra-veicolare; ad esempio, un passeggero connesso alla rete veicolare deve ricevere costantemente news dell'ultimo TG mentre l'automobile, nello spostarsi, cambia rete (IP o fisica, nel caso delle celle DVB-T) di riferimento
- allocazione dinamica dello spettro: la possibilità di spostare dinamicamente la banda dalla rete cellulare alla rete diffusiva può aumentare l'efficienza della rete ibrida.

4. Il Progetto CISMUNDUS

Il Progetto Europeo IST CISMUNDUS[Nota 4] (Convergence of IP-based Services for Mobile Users and Networks in DVB-T and UMTS Systems) si pone lo scopo di permettere la distribuzione di nuovi servizi a larga banda ad utenti in movimento, utilizzando le esistenti tecnologie per il broadcasting e la telefonia mobile in formato digitale.

Nota 4 - Fanno parte del Progetto CISMUNDUS, coordinato dall'Università di Brunel (Uxbridge, Gran Bretagna): Rai Crit, IRT, Motorola, FTR&D, Philips Research Laboratories, TDF, TV Cultura (Brasile). Il progetto è finanziato dalla Information Society Technologies (IST, www.cordis.lu/ist).

Il Progetto CISMUNDUS, a differenza di OverDRiVE, focalizza il lavoro di ricerca sui servizi; servizi audio, video e dati offerti agli utenti mediante una combinazione delle reti DVB-T e GPRS/UMTS, entrambe in grado di garantire buona qualità in ricezione mobile, ottimizzandone l'utilizzo in funzione delle caratteristiche del servizio e della distribuzione della popolazione di utenti che lo hanno richiesto.

Rispetto al Progetto ACTS MEMO (Multimedia Environment for MObiles), che prevedeva già l'utilizzo di una rete ibrida (DAB e GSM) per l'accesso a contenuti multimediali e interattivi, ma utilizzando la rete telecom soltanto come canale di ritorno [4], nel caso del Progetto CISMUNDUS la cooperazione tra i due mezzi trasmissivi è gestita da un'intelligenza di rete.

In particolare, servizi multimediali a carattere generale, quali informazione o intrattenimento, possono essere distribuiti utilizzando il canale diffusivo digitale (DVB-T), mentre le reti di telefonia mobile permettono transazioni personali oppure l'accesso ad informazioni

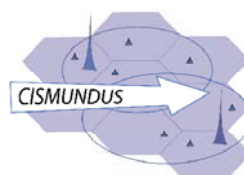



Fig. 3 - Il logo del progetto CISMUNDUS.

più specifiche, per le quali la distribuzione a tutta la popolazione non è necessaria, e anzi comporterebbe un cattivo utilizzo della banda disponibile. Qualora però un contenuto, originariamente offerto via GPRS/UMTS, diventasse popolare, ovvero un elevato numero di utenti ne richiedesse la fruizione, la rete CISMUNDUS sarebbe in grado di renderlo disponibile a tutti, inserendolo all'interno del multiplex DVB-T. Naturalmente, data la diversa capacità trasmissiva dei mezzi utilizzati, la rete deve operare anche un'opportuna scelta del formato del servizio distribuito (ad esempio, scalando il bit-rate di un flusso video MPEG-4).

Un possibile esempio in cui l'adozione di una rete basata sul sistema CISMUNDUS potrebbe offrire nuovi servizi interessanti per gli utenti è rappresentato dallo scenario di una partita di calcio. Gli spettatori presenti allo stadio con un terminale CISMUNDUS possono seguire le immagini della partita, oltre che dal vivo, anche attraverso la telecronaca trasmessa sul canale DVB-T, con la possibilità di replay, informazioni in sovrimpressione e commenti audio. Inoltre, hanno la possibilità di sottoscrivere un certo numero di servizi disponibili, legati al programma su cui sono sintonizzati, quali dati statistici sulla partita e sui calciatori, riprese da diverse prospettive, avvisi in tempo reale sui risultati delle altre partite del campionato, servizi di scommesse on-line, ecc. Gli stessi servizi sono disponibili anche in movimento, durante il tragitto degli spettatori verso lo stadio. Presumibilmente, alcuni di questi servizi addizionali utilizzano il canale diffusivo, poiché di interesse comune (ad esempio le statistiche sulla partita o le riprese di alcune telecamere); altri soltanto il canale telecom, poiché di interesse per un ristretto numero di spettatori oppure poiché si tratta di informazioni personali con requisiti di riservatezza (ad esempio le scommesse). Talvolta, però, un contenuto che originariamente era destinato al canale telecom può diventare così popolare da giustificare la sua trasmissione in broadcast: ad esempio, nel caso di un calcio di rigore contestato, moltissimi spettatori, in un breve intervallo di tempo, potrebbero richiedere il filmato con il replay di quell'azione. In questo caso, dal punto di vista delle risorse di rete, è senz'altro conveniente che questo filmato venga trasmesso sul canale diffusivo piuttosto che ripetuto molte volte sulla rete di telefonia mobile, poiché ciò potrebbe comportare la saturazione delle risorse della cella, con la conseguente impossibilità di soddisfare a tutte le richieste. Gli utenti potrebbero beneficiare inoltre di un bit-rate video maggiore, e quindi di una qualità dell'immagine migliore.

L'accesso all'uno o all'altro mezzo trasmissivo risulta trasparente per l'utente, e viene gestito in modo automatico dal terminale CISMUNDUS, sulla base delle informazioni di servizio ricevute insieme ai dati.

Il sistema CISMUNDUS permette quindi di ottimizzare lo sfruttamento dei mezzi trasmissivi, con conseguenti riduzioni di costo a livello di rete, senza porre limitazioni alle possibilità degli utenti né in termini di mobilità né di scelta dei servizi disponibili, ma fornendo loro anzi nuovi servizi attrattivi. La disponibilità di un'ampia scelta di servizi gratuiti o a basso costo, alcuni dei quali potrebbero fare da portale per servizi personalizzati e a pagamento, potrà fornire un incentivo affinché gli utenti siano invogliati ad adottare questa tecnologia.

4.1 Architettura di Rete in CISMUNDUS

Il sistema CISMUNDUS è costituito da una serie di sottosistemi, come descritto nella figura 4 [5].

Il Service Provisioning Sub-system (SPS) è responsabile della generazione e organizzazione dei servizi forniti, e può comprendere telecamere e relativi encoder MPEG-2 o MPEG-4, video server, server MHP, Web Server, Server BTFTP (Broadcast Trivial File Transfer Protocol, si veda nel seguito). Contiene anche le informazioni costantemente aggiornate dei servizi, in formato MPEG-7, e fornisce, tra le altre cose, le informazioni relative alla Qualità del Servizio, necessarie per l'ottimizzazione della banda disponibile.

Sullo strato di trasporto, il terminale d'utente è interfacciato sia con il Cellular Delivery

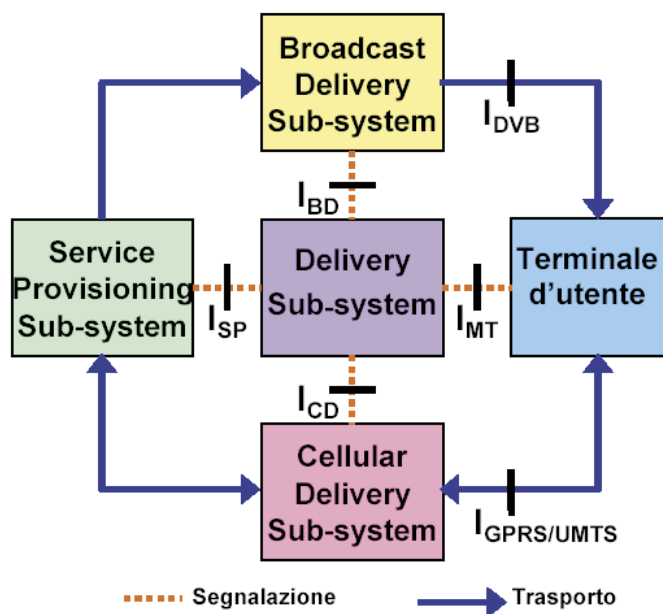



Fig. 4 - Architettura del sistema CISMUNDUS.

Sub-system (CDS), relativo alla rete di telefonia mobile, sia con il Broadcast Delivery Sub-system (BDS), relativo alla rete DVB-T. Come detto, l'accesso ai servizi mediante l'uno o l'altro mezzo trasmissivo viene gestito dal terminale sulla base delle informazioni di servizio ricevute insieme ai dati. Ad esempio, sul canale DVB-T vengono inviati opportuni pacchetti UDP che trasportano Service Announcements e informazioni MPEG-7, o informazioni PSI/SI per la descrizione dei servizi nel multiplex DVB; oppure, sul canale GPRS/UMTS, è utilizzato il protocollo RTSP (Real Time Streaming Protocol) per l'individuazione dell'URL a cui accedere.

Sullo strato di segnalazione, il Delivery Subsystem rappresenta il cuore del sistema, ed ha lo scopo di coordinare la configurazione dei relativi dominii, ottimizzando l'utilizzo delle diverse reti. La selezione della rete utilizzata dipende dalle caratteristiche del servizio (bit-rate, indirizzamento unicast o multicast, requisiti di interattività, ecc.).

La configurazione delle reti (broadcast e telecom) deve assicurare i parametri di Qualità del Servizio richiesti. In particolare, per quanto riguarda l'incapsulamento di flussi IP sul Transport Stream DVB (ad esempio, video streaming MPEG-4), il BDS si occupa della configurazione del gateway DVB-IP, indicando i gruppi multicast IP che devono essere incapsulati (Multi-Protocol Encapsulation). Questa configurazione viene determinata in funzione della condizione di carico istantaneo della rete, dei servizi trasmessi sulle diverse reti e del numero di terminali d'utente connessi al servizio.

La gestione di una rete CISMUNDUS è demandata a cosiddetti "operatori di servizi su rete ibrida", che si occupano della distribuzione dei servizi DVB e/o IP ad utenti mobili, e potrebbero essere radiodiffusori, operatori di telefonia cellulare o terze parti.

5. Trasferimento di file su DVB-T: il BTFTP

In entrambi i progetti europei descritti, la trasmissione di dati su IP attraverso il canale diffusivo digitale avviene attraverso un protocollo creato dal gruppo Multimedialità e Piattaforme Digitali del Crit: il BTFTP. Il protocollo BTFTP (Broadcast Trivial File Transfer Protocol) nasce nel 1999, dall'esigenza di sviluppare servizi di *data-broadcasting* sui canali satellitari DVB e dalla mancanza di protocolli standard che rispondevano a questo requisito. Tali servizi sono caratterizzati principalmente dalla mancanza del canale di ritorno e dall'esistenza di un gran numero di terminali che ricevono contemporaneamente la stessa trasmissione.

Il protocollo BTFTP è stato definito prendendo spunto principalmente dal protocollo TFTP (Trivial File Transfer Prorocol [6]) e permette di trasferire file su canali uni-direzionali supportando sia il protocollo Ipv4 sia il protocollo Ipv6, in modalità unicast e multicast. La specifica comprende inoltre l'utilizzo opzionale del canale di ritorno per rendere attendibile il trasferimento dei contenuti.

Utilizzando il profilo MPE (Multi-Protocol

Encapsulation) del protocollo DVB è stato possibile basare il BTFTP sui protocolli Internet, rendendo il più possibile semplice e flessibile il protocollo: secondo le specifiche del BTFTP i pacchetti sono stati pensati per essere inseriti nel protocollo UDP, caratterizzato dalla mancanza della gestione del flusso (senza connessione, a differenza dei pacchetti TCP) e dalla possibilità di essere trasmessi su indirizzi multicast, questo tipo di pacchetto è quello che meglio si adatta con i canali digitali di tipo diffusivo.

La specifica del BTFTP definisce un certo numero di tipi di pacchetto che vanno a comporre la trasmissione di un file: BTFTPWriteRequest, BTFTPWriteRequestExtension, BTFTPData e, per il canale di ritorno ozionale, BTFTPNak. Tutti i pacchetti hanno un header comune che specifica: l'identificatore di trasmissione (TID) che identifica la trasmissione di un singolo file e che permette di trasmettere più file nello stesso momento; un codice operativo che specifica il tipo di pacchetto, il numero di pacchetto e il tipo di ridondanza che viene utilizzato (Checksum, CRC32 oppure nessuna ridondanza).

Tipicamente, i servizi di tipo *data-broadcasting* consistono nella distribuzione di file; dove per file si intendono documenti, immagini, applicazioni, contenuti audio-video e in generale qualsiasi informazione presente su di un supporto di memoria; verso terminali in grado solamente di ricevere un flusso di informazioni, questo tipo di trasmissione da un lato permette di raggiungere molti utenti con una singola trasmissione, massimizzando lo sfruttamento dei canali digitali di tipo diffusivo (satellitare, terrestre) dall'altro introduce il problema di non poter avere un riscontro sul buon esito o meno della trasmissione

BTFTP aumenta l'affidabilità delle trasmissioni attraverso due approcci diversi, tutt'ora in corso di sperimentazione. Il primo approccio consiste nella gestione di un canale di ritorno su cui ri-

BTFTB
UDP
IP (multicast)
DVB-MPE
MPEG2-TS

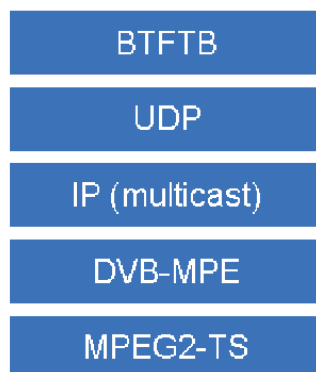



Fig. 5 - Livelli protocollari coinvolti da BTFTP per la trasmisisone su DVB.

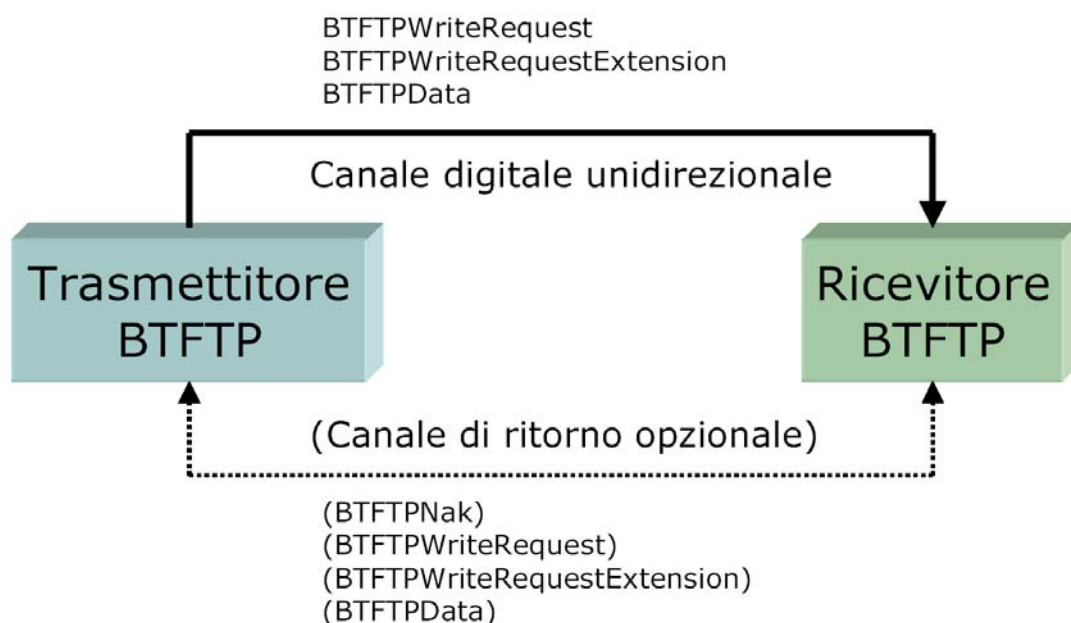



Fig. 6 - Schema di funzionamento generale di BTFTP.

chiedere e ricevere i pacchetti persi; il secondo consiste nell'utilizzo di un FEC (Forward Error Correction) aggiuntivo a livello di codifica del file da spedire. Entrambe le soluzioni rendono possibile l'utilizzo del BTFTP anche su canali pesantemente affetti da disturbi.

6. Il nuovo standard DVB-X e UMTS

Il Consorzio DVB ha recentemente formalizzato l'esistenza di un nuovo gruppo di lavoro, il DVB-X (si confronti [7] e [8]), che studierà un nuovo standard in grado di fornire, tramite una connettività broadcast (uno a molti), contenuti e servizi multimediali ad utenti mobili. Il DVB-X si baserà, almeno inizialmente, sul DVB-T e lo scenario di riferimento sarà quello in cui utenti mobili riceveranno i segnali tramite terminali mobili dotati di batteria, operanti con una singola antenna in network "single-frequency" e riceventi anche a velocità elevate di guida. Questi terminali saranno di piccole dimensioni e integreranno anche le funzionalità di "mobile-phone". Il consumo di potenza considerato sarà inferiore a 100mW per il front-end completo, incluse le parti radio, e la banda in gioco sarà dell'ordine di 15 Mbps.

Il DVB-X consentirà, quindi, ai broadcaster di guadagnare milioni di nuovi utenti tra quelli mobili fornendo loro la possibilità di fruire di contenuti televisivi mentre sono in movimento; il DVB-X dovrebbe diventare, infatti, uno standard per i terminali "hand-held".

Una questione cruciale sarà la gestione (e la possibilità) della convivenza di DVB-X con la rete DVB-T presente sul territorio in termini di allocazione delle frequenze. Un altro problema sarà legato alle batterie dei terminali la cui autonomia, oggi, non consentirebbe di realizzare servizi di diffusione broadcast 24 ore su 24. Altre implicazioni derivano anche dalla complessa realizzazione di un terminale in grado di interfacciarsi sia col mondo UMTS/GPRS che con quello DVB-T.

Dal punto di vista degli operatori di telefonia mobile, in 3GPP (3rd Generation Partnership Project), si lavora per l'approvazione (prevista per il 2010) delle specifiche sul MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service) che consentirà di fornire agli utenti della rete cellulare servizi audiovisivi in broadcast o multicast. Il problema è che l'offerta su reti cellulari avverrebbe su canali dedicati sottraendo quindi capacità di banda al traffico telefonico e agli altri servizi; in quest'ottica, quindi, il DVB-X non dovrebbe essere visto come un concorrente, ma percepito come uno standard efficace, in termini di costi, che può consentire all'operatore di telefonia mobile di allargare l'offerta includendo anche servizi broadcast.

7. Conclusioni

Lo sforzo di ricerca tutt'ora in corso sull'utilizzo di reti ibride terrestri ha delineato diverse possibilità tecnologiche per la creazione di nuovi e più efficaci servizi per gli utenti. L'utilizzo cooperativo di rete diffusiva digitale e rete cellulare mobile di terza generazione potrebbe migliorare il modo in cui accediamo ai contenuti e comunichiamo. In particolare, la convergenza tra le due reti, regolata dal lavoro di standardizzazione in corso in ambito DVB, permetterebbe all'utente di accedere a servizi eterogenei ed innovativi su di un unico terminale, e sarà favorita dall'adozione di protocolli, basati su IP, in grado di adattare a canali broadcast meccanismi trasmissivi largamente usati nelle reti telecom. Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai, forte anche dell'esperienza maturata nella sperimentazione di servizi video, audio e dati su reti DVB-T in ricezione mobile e fissa, ha contribuito attivamente alla ricerca. In particolare, i prototipi che i progetti OverDRiVE e CISMUNDUS stanno realizzando dimostrano concretamente alcuni scenari di utilizzo di servizi di nuova generazione. L'attenzione verso la integrazione di rete digitale terrestre e reti cellulari 3G trova anche conferma nella realizzazione di prototipi di terminali mobili di terza generazione a basso consumo di po-

tenza, in grado di ricevere anche il segnale televisivo digitale terrestre, sia nell'ambito dei progetti europei sopra considerati che da parte di costruttori operanti nel mercato delle telecomunicazioni.

Bibliografia

1. ETSI EN 30 744, "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", V1.4.1, January 2001.

2. R. Tönjes, K. Mößner, T. Lohmar, M. Wolf: "OverDRiVE - Spectrum Efficient Multicast Services to Vehicles", IST Mobile Summit, Thessaloniki, 16-19.June, 2002.

3. S. Deering, R. Hinden: "Internet Protocol, version 6 (IPv6), Specification", RFC2460, December 1998.

4. D. Milanesio, V. Sardella: "Servizi multimediali e interattivi nel DAB (Digital Audio Broadcasting)", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 1,Aprile 1999.

5. P. Casagranda, D. Milanesio et Al.: "Architecture and Proof-of-Concept Implementation for Mobile/Broadcast Hybrid Networks", ConfTele2003, Aveiro (Portogallo), June 2003.

6. K. Sollins: "The TFTP Protocol (Revision 2)", IETF RFC1350, July1992.

7. TM 2721 rev.1, "Technical AHG DVB Mobile (DVB-M) Terms of reference"

8. J. Henriksson, "DVB-X", DVB Scene n.5, March 2003.

Il protocollo SNMP per il Fault Detection dei trasmettitori DVB-T

ing. Silvestro Terranova[1],
ing. Francesco Maria Raimondi[2],
prof. Giansalvo Cirrincione[3],
ing. Danilo Pellegrino[4]

L'articolo sintetizza la tesi di laurea di Silvestro Terranova "Applicativo per l'integrazione del Fault Detection di nodi SNMP nel sistema di telecontrollo dei centri trasmittenti di Rai Way"
– Università di Palermo – Facoltà di Ingegneria – Corso di Laurea in Ingegneria Informatica – A.A. 2003-2004.

[1] Rai Way – Gestione Reti – Bologna
[2] Relatore - Università di Palermo – Dipartimento di Ingegneria dell'Automazione e dei sistemi.
[3] Correlatore - Università di Palermo – Dipartimento di Ingegneria dell'Automazione e dei sistemi.
[4] Tutor Aziendale - Rai Way – Ingegneria - Roma

Sommario
Le specifiche per il controllo delle stazioni trasmittenti della Rai sono state scritte nel 1985. In queste specifiche è descritta la struttura di una stazione trasmittente e per ciascuna sezione vengono elencati i comandi, i segnali e gli allarmi necessari per il telecontrollo. I primi sistemi di telecontrollo si basavano su tecnologie analogiche, i segnali e i comandi erano di tipo ON/OFF.
Lo sviluppo delle tecnologie digitali e delle comunicazioni, l'uso sempre più diffuso di sistemi a microprocessore e l'introduzione di nuovi protocolli di gestione ha consentito l'integrazione dei primi sistemi di telecontrollo in un unico sistema SCADA (il SITT) e ha semplificato il fault detection dei nuovi trasmettitori dedicati al digitale terrestre attraverso il protocollo SNMP.

1. Generalità

Fin dall'inizio delle trasmissioni la Rai è stata concessionaria del servizio radiotelevisivo pubblico, questa concessione viene rinnovata periodicamente con un contratto di servizio. L'articolo 22 del contratto di servizio recita:

"*La RAI procede a dotare le proprie reti di tutti i mezzi atti alla telesorveglianza e al telecontrollo necessari al loro buon funzionamento*" [1].

Il telecontrollo degli impianti è quindi un elemento vincolante per lo *status* di servizio pubblico ma "diventa sempre di più una necessità indispensabile per una emittente radiofonica o televisiva: conoscere a distanza lo stato di efficienza dei propri impianti di diffusione, in tempo reale, ma senza muovere uomini e macchine, è diventato ormai essenziale per "certificare" la propria affidabilità nella gestione di una rete di trasmissione" [2].

L'esercizio di una rete di diffusione comprende un insieme di attività molto diversificate: in prima analisi vi si possono convenzionalmente distinguere la

"conduzione" e la "manutenzione" degli impianti; poiché questi ultimi sono di regola realizzati in modo da garantire un funzionamento automatico, la conduzione consiste soprattutto nel verificare il buon funzionamento degli impianti e nell'impartire opportuni comandi affinché essi svolgano correttamente il prescritto servizio [3].

Le specifiche per il telecontrollo degli impianti trasmittenti sono state redatte nel 1985 da un apposito gruppo di lavoro. In questo documento viene illustrata la sistemistica delle varie sezioni di una stazione trasmittente. Per ciascuna tipologia di sistema e per ciascuna sezione d'impianto vengono elencati dettagliatamente i comandi locali e distanti, i segnali locali e distanti e gli allarmi con cui si può controllare l'impianto.

All'inizio il telecontrollo degli impianti di trasmissione è stato pensato a livello locale: gli impianti di ciascuna regione erano controllati dai tecnici e da uno o due centri controllanti presidiati situati nella stessa regione o nelle regioni limitrofe.

Fig.1 - Foto del Centro di Controllo Reti di diffusione di Milano.

I comandi dal centro di controllo verso i centri trasmittenti e i segnali dai centri trasmittenti ai centri di controllo viaggiano su canali telefonici in banda fonica. La visualizzazione dei segnali e degli allarmi ha progredito nel tempo, dapprima venivano visualizzati attraverso tessere luminose, poi attraverso messaggi testuali su monitor e schemi grafici realizzati con caratteri ASCII fino ad arrivare alle interfacce grafiche gestibili attraverso un comune browser web.

Nel sistema Microstudi, ad esempio, un centro controllante può gestire al massimo 10 stazioni controllate e ciascuna stazione controllata può essere gestita al massimo da tre centri controllanti.

2. Il SITT Rai Way

Alla fine degli anni 90 è iniziata la fase di digitalizzazione dei collegamenti in ponte radio utilizzando il protocollo SDH dovuto anche al fatto che la legge imponeva lo spegnimento di molti fasci analogici per liberare le frequenze a favore della telefonia mobile. Questo comportava una diminuzione della capacità trasmissiva analogica per i canali telefonici.

Ci si è trovati quindi nella necessità di dovere convogliare tutte le informazioni provenienti dai centri TX in un unico centro di controllo (Centro Nazionale di Controllo Reti di Diffusione, CNCRD) utilizzando dei flussi digitali messi a disposizione dal sistema SDH e abbandonando la trasmissione attraverso i canali telefonici analogici, considerando anche che i sistemi di telesorveglianza installati nei diversi centri TX sono diversi ed utilizzano quindi diversi protocolli di comunicazione; il sistema Microstudi è solo uno dei diversi sistemi installati nel corso degli anni, infatti sui

centri Rai Way sono installati anche sistemi Algorab, Sarte, Cet, ecc.

Sulla base delle precedenti considerazioni nasce il Sistema Integrato Telesorveglianza Territoriale.

3. Struttura hardware

Tutti i centri trasmittenti dislocati sul territorio sono collegati attraverso una rete IP dedicata integrando i sistemi di telesorveglianza già esistenti.

Nell'ambito di ciascuna stazione esiste una rete LAN. L'inserimento in LAN dei concentratori base avviene attraverso un'unità di interfaccia RTU (Remote Terminal Unit) realizzata dalla STAER di Roma. Questa unità si interfaccia con la porta seriale presente sul concentratore base del vecchio sistema di telesorveglianza. Ad ogni RTU, e quindi ad ogni centro, viene assegnato un indirizzo IP. Un router collegato a dei mux link permette l'inserimento in rete, attraverso un flusso a 2 Mbit/s, inserito nella rete SDH tramite un'interfaccia standard (figura 2).

Dalla figura si vede anche la possibilità di un collegamento ISDN che il router attiva in caso di interruzione dei flussi a 2 Mbit/s. Su qualche centro è presente anche un PC con il quale è possibile accedere alla rete.

I centri dislocati sul territorio sono suddivisi in tre zone: Nord, Centro e Sud. Ogni zona fa capo ad un server in configurazione Cluster, ossia due computer funzionano contemporaneamente, in caso di guasto o di manutenzione di uno, il controllo passa immediatamente all'altro.

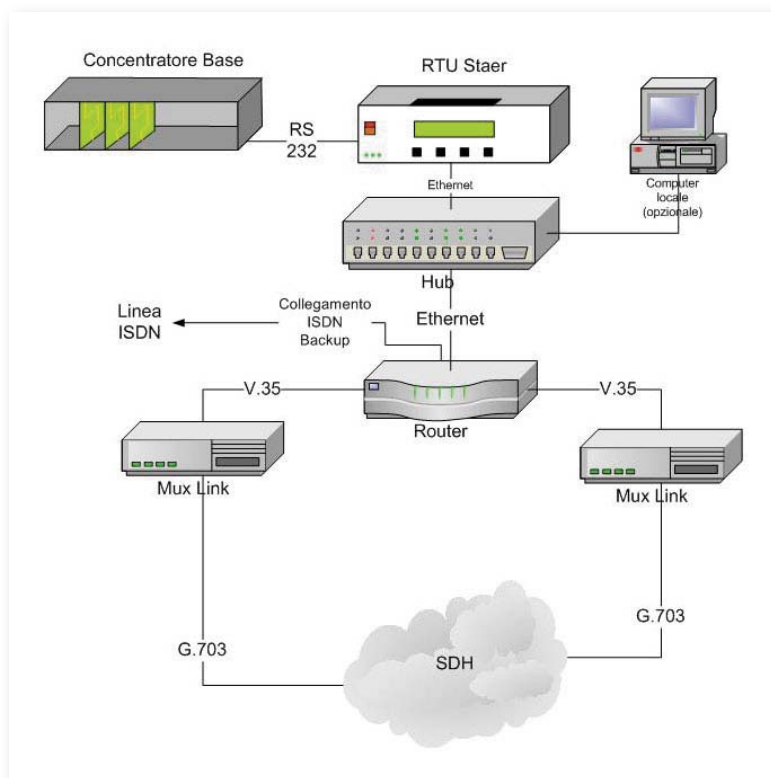



Fig. 2 - Schema dell'inserimento in LAN del sistema di telesorveglianza.

4. Struttura software

In figura 3, è riportata la struttura software del SITT [4].

La filosofia seguita nel realizzare il software è:

- Software ad architettura Modulare;
- Informazioni in formato unificato;
- Interfaccia WEB (accesso con un browser standard);
- Funzioni di security:
  - o Login e password associate a ciascun operatore;
  - o Viste differenziate per operatori con funzionalità diverse.

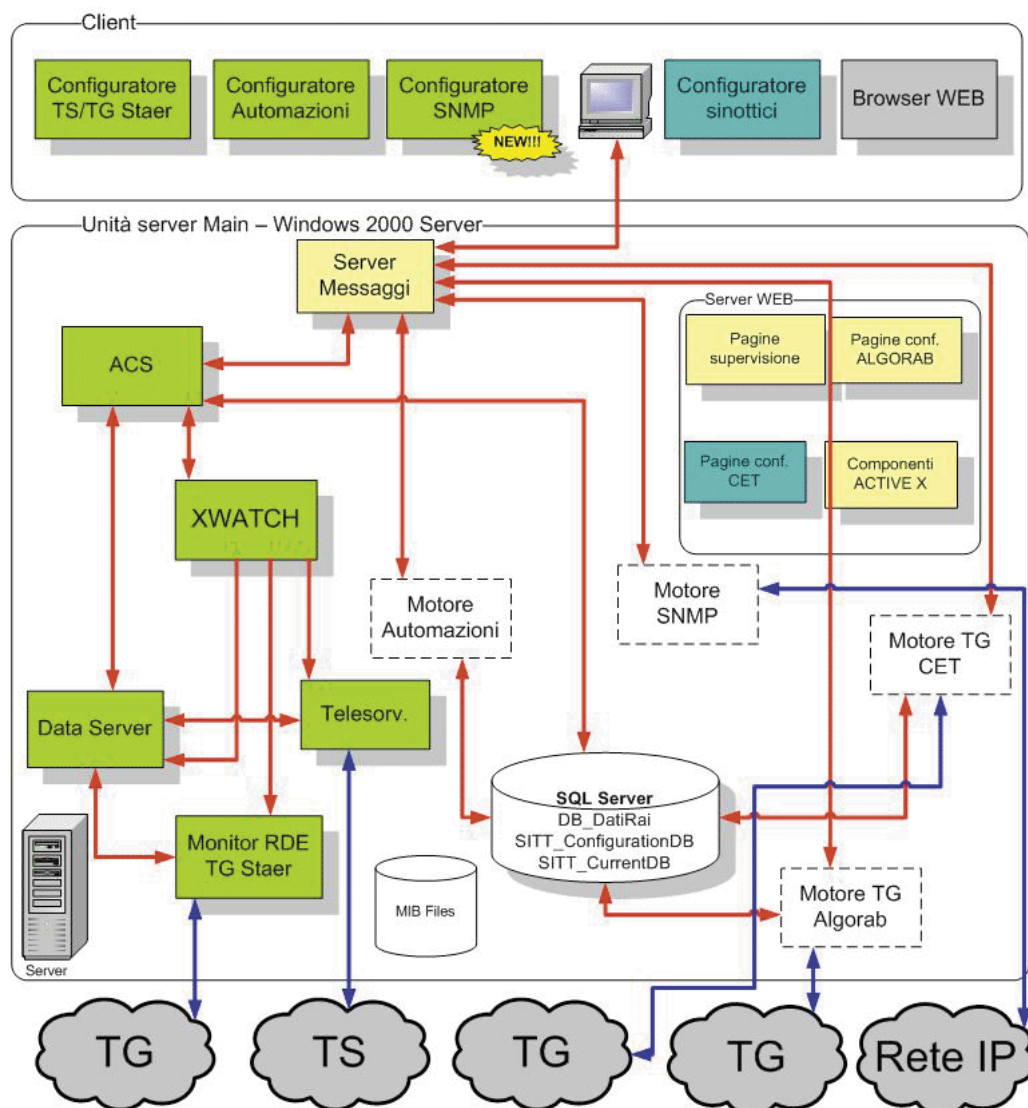
Il software ha un'architettura modulare di tipo client-server.

Su ciascun server è installato il sistema operativo Microsoft Windows 2000 Server e su di esso girano i *driver* o *motori*, che in figura 3 sono indicati con un rettangolo bianco, cioè i programmi che gestiscono la comunicazione con i dispositivi di campo (RTU) e scrivono i dati ricevuti sulla base dati di processo. Il driver interroga periodicamente tutti i centri TX (*polling*[Nota 1]) e registra sul database i dati ricevuti. Esiste un motore per ciascun tipo di sistema di telesorveglianza e i singoli motori sono stati sviluppati da ditte diverse.

Nota 1 - Interrogazione ciclica dei dispositivi.

5. Naming Convention del SITT Rai Way

I motori che eseguono il *polling* sono stati realizzati da ditte diverse e ciascuno di essi può utilizzare per il suo funzionamento delle tabelle di un database residente sul server. In fase di progettazione si è però posto il vincolo di rispettare una *name convention*, i singoli punti (telesegnali) vengono cioè individuati univocamente scorrendo un albero, così come schematizzato in figura 4.

Fig. 3 - Struttura software del SITT.

Come si vede dalla figura, l'ultimo livello dell'albero è costituito dai punti che possono essere suddivisi in telesegnali, telecomandi e telemisure. I telesegnali e i telecomandi sono associati a punti di tipo ON/OFF, fisicamente costituiti da contatti elettrici mentre le telemisure sono dei valori numerici ottenuti da una conversione analogico/digitale.

Ogni punto può prevedere più stati (tipicamente 2 ON e OFF) e a ciascuno di questi può essere associata una diversa severità. La severità indica la gravità del verificarsi dell'evento e va da *clear* a *critical*.

6. Il protocollo SNMP

La tecnologia Simple Network Management Protocol [5] nasce come evoluzione di SGMP[Nota 2] (Simple Gateway Monitoring Protocol). Dal '90 ad oggi l'evoluzione di SNMP non si è mai fermata: dal 1993 al 1996 l'IETF è stata impegnata nei draft di SNMP versione 2 (SNMPv2) e nel Gennaio '98 viene pubblicato il primo RFC [6] per SNMP versione 3 (SNMPv3). Nel Marzo 2002 l'IETF ha approvato come standard SNMPv3.

SNMP si basa su una semplice architettura "manager-agent". Ogni nodo della rete (host, bridge, router,…) può contenere un software dedicato al network management denominato agent. Tale agent svolge i seguenti compiti:

- accede ai parametri relativi allo stato del dispositivo;
- tiene traccia della configurazione del dispositivo;
- rivela malfunzionamenti del dispositivo o azioni significative che lo interessano, ad esempio il login di un utente, segna-

Nota 2 - protocollo progettato nel 1987 per la gestione dei router che costituiscono il backbone di Internet.

Fig. 4 - Struttura dell'albero della naming convention.

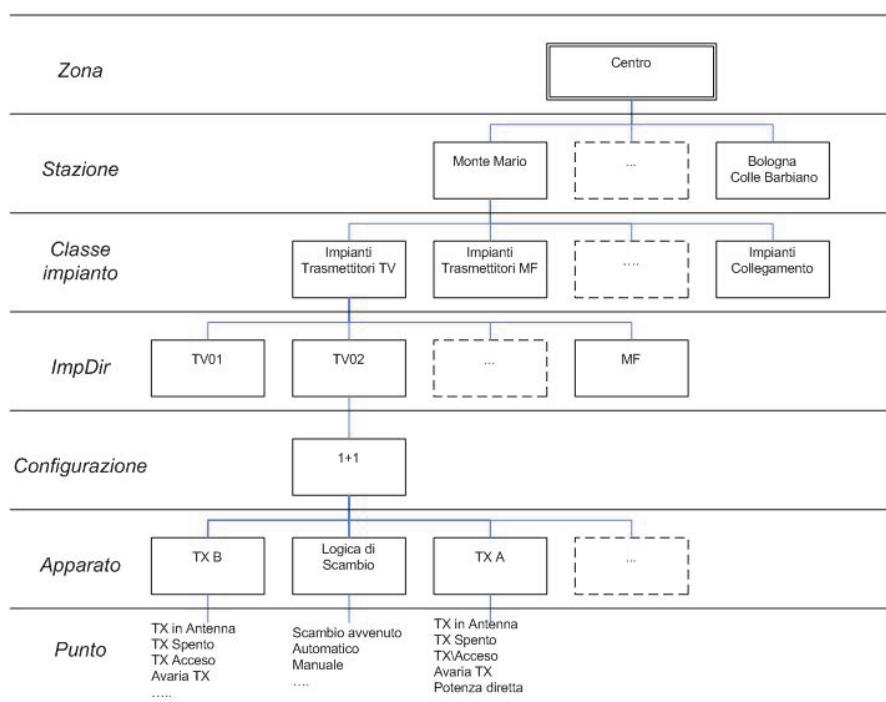
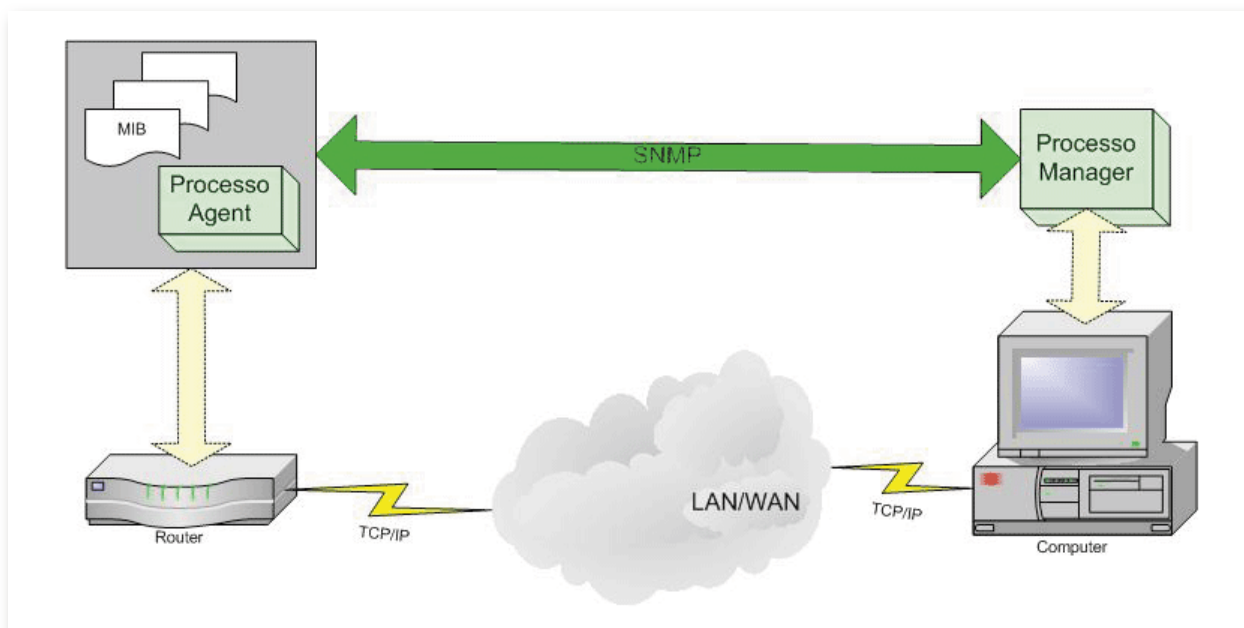



Fig. 5 - Architettura del sistema di gestione SNMP.

landoli alla stazione di gestione tramite l'invio di eventi (chiamati *trap*);

- risponde ai comandi inviati dalla stazione di gestione.

Ogni agent, quindi, si occupa del mantenimento delle informazioni relative all'oggetto gestito che possono essere utili nelle attività di gestione. Queste informazioni costituiscono un database chiamato *Management Information Base* (MIB). È interessante notare che le informazioni utilizzate dalla stazione di gestione sono memorizzate all'interno dei MIB di tutti i dispositivi gestiti, che costituiscono, quindi, un database distribuito.

In figura 5 viene visualizzata l'architettura di un sistema di gestione SNMP.

I principali standard specificati nell'ambito della gestione SNMP sono:

1. **SMI** (*Structure of Management Information*). Definisce le modalità con cui le informazioni di gestione sono strutturate internamente;

2. **MIB** (*Management Information Base*). Definisce un'organizzazione gerarchica per le informazioni di gestione. I MIB sono costituiti dai managed objects e sono identificati dagli object identifiers. Un managed object (che a volte è chiamato MIB object o object o anche MIB) è una delle tante caratteristiche di una risorsa monitorata (managed device). L'object ID (OID) identifica univocamente un managed object nella gerarchia MIB. Una gerarchia MIB può essere rappresentata come un albero la cui radice è un nodo senza nome e in cui ogni livello è assegnato ad una diversa organizzazione. La figura 6 illustra un MIB-tree. Gli object ID nei livelli più alti del MIB-tree appartengono a diverse organizzazioni degli standard (CCITT, ora ITU-T; ISO; ISO e CCITT insieme). I livelli inferiori sono assegnati ad associazioni affiliate con le organizzazioni di livello superiore. Le aziende

possono definire rami privati del MIB-tree in modo da includere gli object ID dei loro prodotti. I MIB che non sono stati standardizzati vengono collocati, tipicamente, nel ramo experimental. Gli object possono essere referenziati univocamente dal loro object name o, in modo equivalente, dall'object descriptor: una sequenza di numeri che permette di esplorare l'albero fino all'oggetto richiesto. Ad esempio, l'object atInput può essere individuato dal suo *object name*:

iso.identifiedorganization.dod.internet.private.enterprise.cisco.temporary.variables.AppleTalk.atInput

o dall'object descriptor:

1.3.6.1.4.1.9.3.3.1.

3. **SNMP**. È il protocollo di comunicazione vero e proprio (e dà il nome a tutto il modello di gestione). Il protocollo è estremamente semplice ed è costituito da solo 4 operazioni:

   1. *Get*: viene usato dal *Network Managment System* (NMS) per leggere da un agent il valore di una o più istanze di un object;
   2. *GetNext*: viene usato dal NMS per leggere il valore successivo da una lista o da una tabella di valori di un agent;
   3. *Set*: assegna un valore ad un object;
   4. *Trap*: viene usata dall'agent per informare l'NMS di un evento significativo. È l'unica operazione definita nel protocollo di comunicazione che parte dall'agent per arrivare all'NMS (e non viceversa).

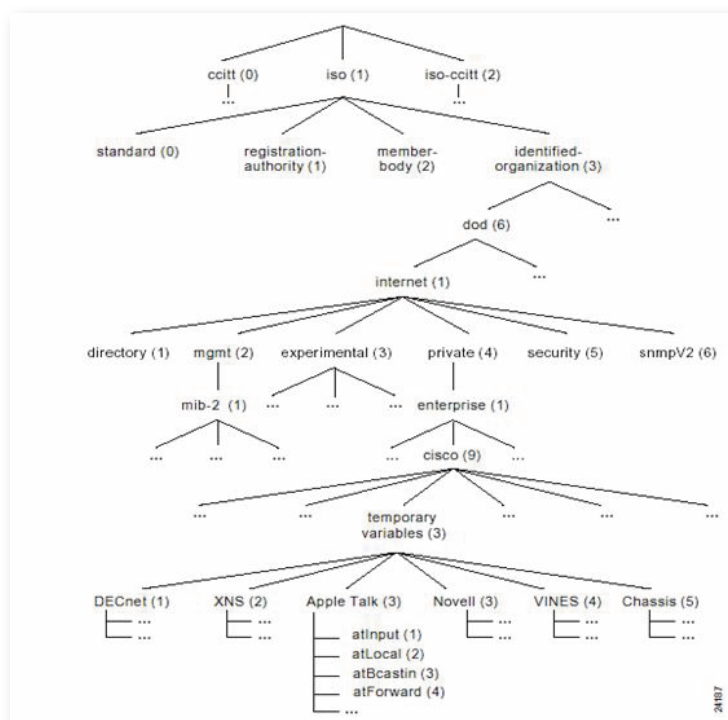



Fig. 6 - Un esempio di MIB-tree.

In SNMPv2 sono state introdotte 2 nuove istruzioni:

5. *GetBulk*: usato dall'NMS per recuperare grandi quantità di dati, come ad esempio più righe di una tabella, contemporaneamente;
6. *Inform*: permette ad un NMS di inviare una *Trap* ad un altro NMS e di ricevere una risposta. Di fatto implementa un modello gerarchico anche fra gli NMS.

Il vantaggio di questo approccio alla gestione risiede chiaramente nella sua estrema semplicità architetturale, fattore questo che ha contribuito ad una sua ampia diffusione.

Ciò nonostante la tecnologia SNMP ha delle limitazioni. È opportuno, infatti, notare che:

- gli agent non sono in grado di svolgere operazioni complesse sui dati, ad esempio la correlazione: tali operazioni vengono demandate alla stazione di gestione;
- le modalità di organizzazione dei dati all'interno degli agent sono staticamente definite e cioè non possono subire variazioni durante la vita dell'agent stesso;
- SNMP si basa sul protocollo UDP. Questo protocollo non garantisce la consegna dei dati a destinazione. Conseguentemente, sia l'invio degli eventi da parte degli agent che dei comandi da parte della stazione di gestione risulta non affidabile.
- SNMP utilizza un meccanismo di sicurezza troppo semplice e poco sicuro.

Per incrementare il meccanismo di sicurezza è stato introdotto SNMPv3

7. Esempio di definizione di un OID

Riportiamo un esempio di definizione di un OID tratto dalla MIB di un trasmettitore del DVB-T costruito dalla Rodhe & Schwarz.

```
rfOn
OBJECT-TYPE
  SYNTAX INTEGER { true(1), false(2) }
  ACCESS read-only
  STATUS mandatory
  DESCRIPTION
      "RF present/on
      (Bit 4 of CCU state register)
       true(1)  --> RF present ( RF level > RF
  fault level)
      false(2) --> RF not present ( RF level < RF
  fault level)
      Example: RF fault level    = -3.0dB
      RF level = -3.5dB      ===> RF not present "
::= { statusTx 4 }
```

Questa parte definisce un tipo enumerativo o multi stato, l'OID di questo tipo restituisce un valore intero associato ad un particolare significato, ad esempio se viene restituito il valore 1 (true) allora all'uscita del trasmettitore è presente il segnale, se il valore è 2 (false) allora il segnale in uscita è inferiore alla soglia di allarme impostata.

8. Il controllo dei trasmettitori DVB-T

Dal 1 gennaio 2004 sono iniziate le trasmissioni televisive di digitale terrestre. I trasmettitore dedicati a questo servizio utilizzano le più moderne tecnologie per il loro funzionamento. Per il controllo dei segnali trasmessi e del funzionamento del trasmettitore vengono utilizzati apparati a microprocessore (figura 7). Questi apparati sono dotati anche di una interfaccia LAN grazie alla quale possono essere inseriti in rete ed avere assegnato un indirizzo IP. Questo permette di gestire questi apparati sia attraverso pagine Web (sono dotati di un web server), sia attraverso il protocollo SNMP.

La gestione via web, benché già pronta, non si può utilizzare per il monitoraggio continuo da un centro di controllo, ci vorrebbe infatti un operatore che ciclicamente andasse a consultare i singoli trasmettitori controllandone lo stato.

Per il controllo, quindi, è più indicato il protocollo SNMP. L'interrogazione ciclica viene effettuata da un nuovo *motore*. D'ora in poi indicheremo con *nodo SNMP* qualsiasi dispositivo inserito nella LAN che sia gestibile con il protocollo SNMP. Ogni nodo SNMP è fornito con un file di testo che ne descrive la MIB.

Fig. 7 - Foto della logica di controllo del trasmettitore DVB-T denominata NETCCU.

La struttura del SITT all'interno di in centro trasmittente diventa quindi quella di figura 8.

Oltre al motore SNMP è stato necessario realizzare anche il relativo configuratore.

9. Inserimento dei nodi SNMP nel SITT

Come si è visto nei paragrafi precedenti sia la *naming convention* che l'SNMP sono delle strutture ad albero.

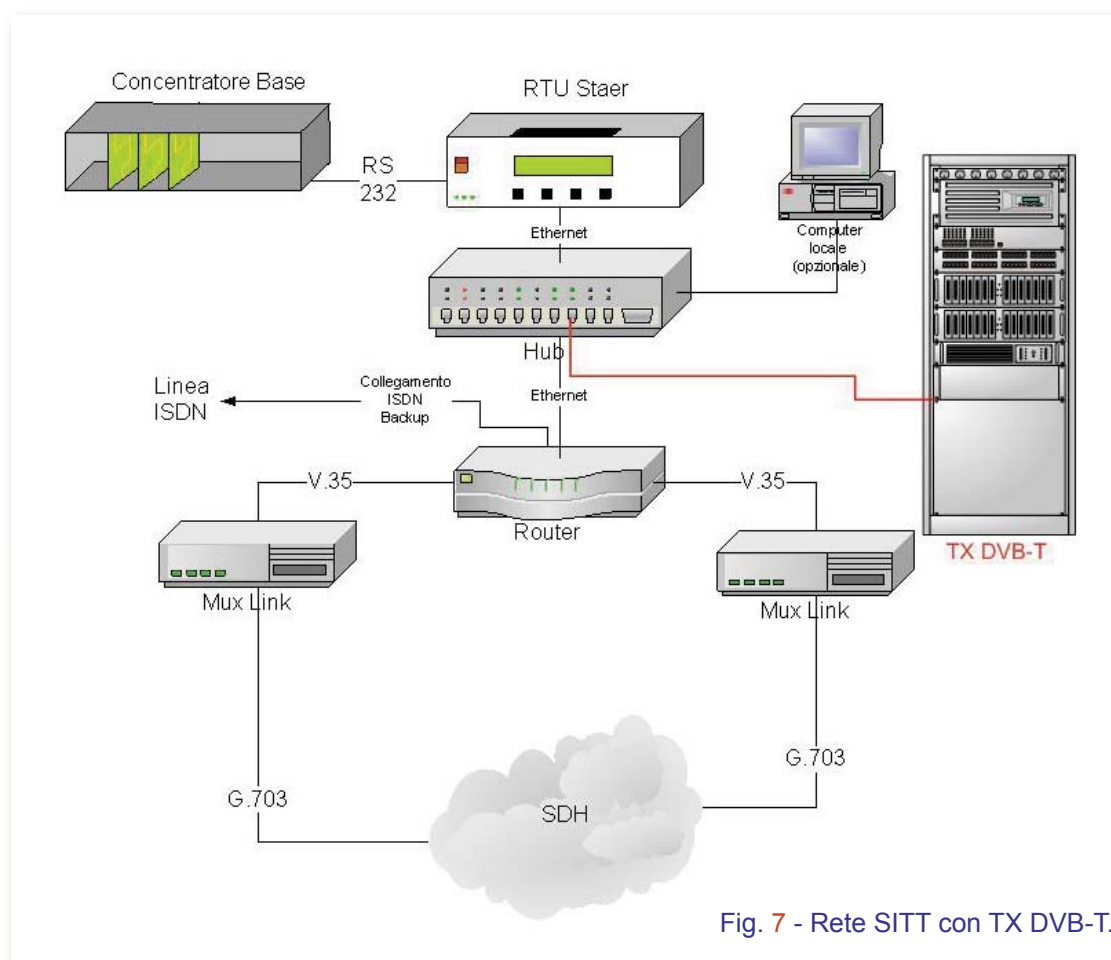



Fig. 7 - Rete SITT con TX DVB-T.

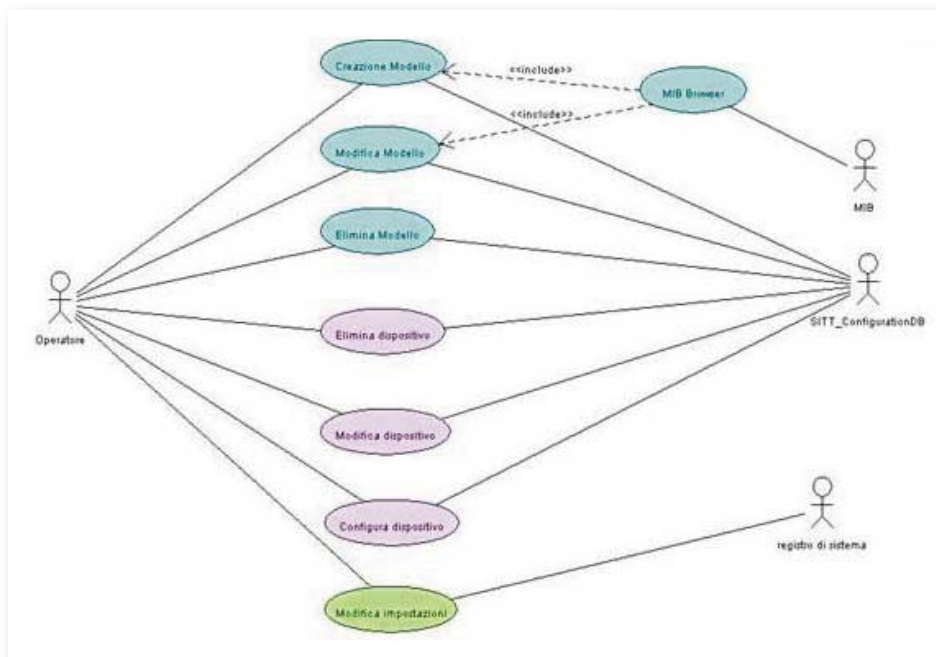
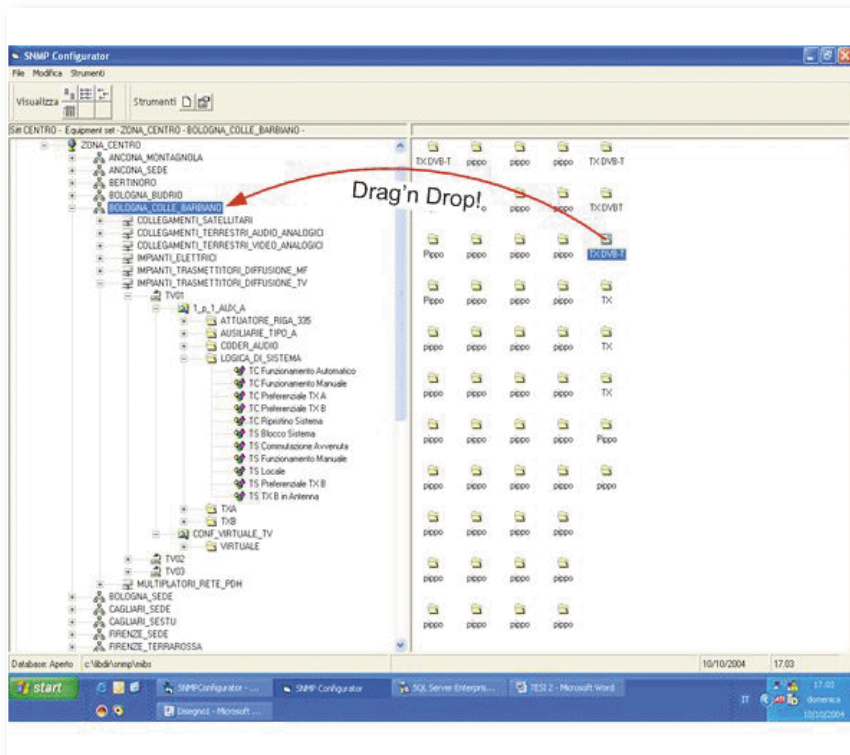



Fig. 9 - Diagramma Use-Case del configuratore SNMP.

Fig.10 - Interfaccia del configuratore SNMP.

Il problema che si pone nell'inserire i nodi SNMP in un sistema di controllo come il SITT, è quello di riuscire ad associare degli OID che possono restituire valori di tipo diverso (stringhe, interi, reali, ecc.), in un sistema che utilizza solo tipi di dato digitali (on/off) o analogici.

Per ciò che riguarda i dati interi o reali tipicamente utilizzati per le telemisure, non ci sono particolari problemi; una soluzione va invece cercata per quegli OID di tipo enumerativo, cioè quelli che restituiscono più valori interi, ciascuno associato ad un particolare significato.

La soluzione trovata consiste nell'utilizzare la possibilità di poter associare a ciascun punto della *naming convention* più valori, ciascuno con una diversa severità. In questo modo si ottiene una corrispondenza tra OID e punti e si utilizzano i valori enumerativi associandoli ad una diversa *severità*. Ad esempio, consideriamo un punto denominato "Bassa RF TX" ed associamolo all'OID "RfOn" visto nel paragrafo precedente; ai valori restituiti si assegneranno due differenti livelli di severità e precisamente al valore 1 (presenza RF) si assocerà la severità "Clear" e al valore 2 (RF < RF Fault) si assocerà la severità "Critical".

10. Il configuratore SNMP

Per potere inserire nel SITT i nodi di rete SNMP è stato necessario realizzare un software ad hoc, chiamato configuratore SNMP.

Il configuratore è un'applicazione che gira sui PC client e in pratica è un'interfaccia tra l'operatore e due database: quello del SITT e quello dei file MIB contenenti tutti gli OID e situati in una directory predefinita sul server.

L'interfaccia che si presenta all'operatore (figura 10) è composta da un lato dall'albero della *naming convention* e dall'altro dalle icone relative ai modelli dei nodi SNMP.

Per effettuare la configurazione[Nota 3] di un nodo di rete SNMP l'operatore quindi deve prima crearne un modello inserendo i dati del dispositivo e selezionando gli OID (figura 11) che devono essere controllati. In questa fase è possibile effettuare l'associazione tra OID e punti della *naming convention* (figura 12).

Se il modello è stato creato, l'operatore con una semplice operazione di *drag and drop*, trascina l'icona del modello di nodo SNMP su un nodo dell'albero della *naming convention*, quindi inserisce i parametri specifici del nodo come l'indirizzo IP, l'indirizzo SITT, il tempo di polling, …; se necessario può modificare i parametri di gestione degli allarmi (severità, suoneria, archiviazione, stampa, …) e quindi inserire il nodo nel SITT.

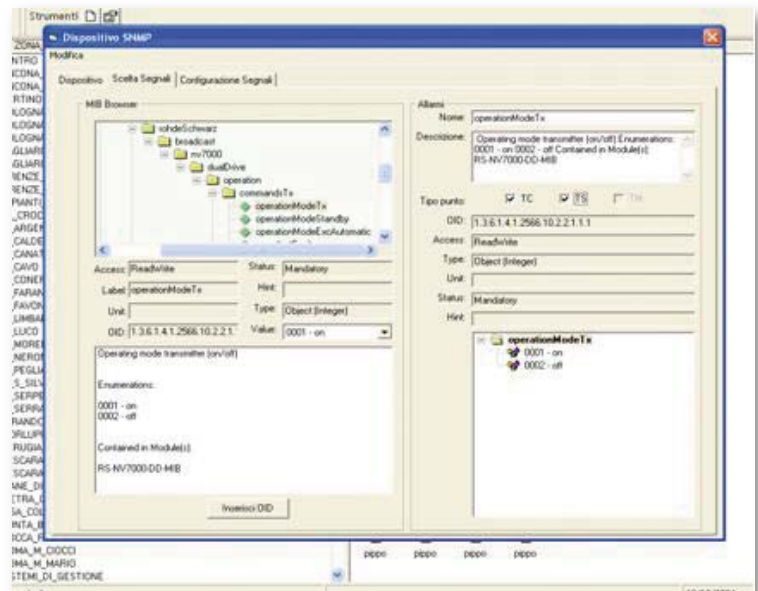
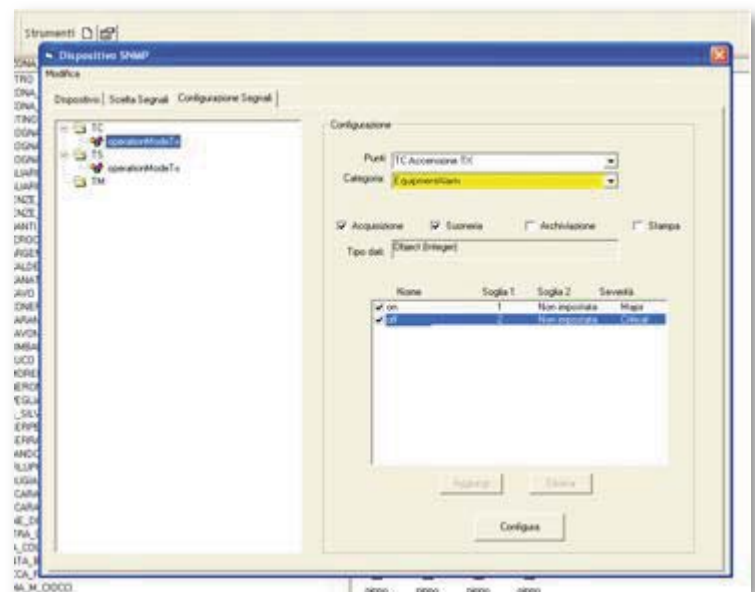
Fig.11 - Interfaccia del configuratore SNMP per la selezione degli OID.

Nota 3 - Con il termine *configurazione* si intende l'inserimento di un nodo SNMP nel SITT.

Fig.12 - Interfaccia per l'associazione tra OID e punti della naming convention.

11. Conclusioni

Le tecnologie che hanno permesso la diffusione di internet hanno semplificato notevolmente il telecontrollo degli impianti e sicuramente il rinnovo degli apparati di trasmissione lo semplificherà ulteriormente: i fasci di cavi per i telesegnali e i telecomandi paralleli verranno sostituiti da un cavo ethernet. La velocità delle comunicazioni permetterà inoltre un controllo delle caratteristiche degli apparati sempre più accurato e quindi maggiore velocità di intervento da parte dei tecnici di manutenzione, che comunque rimarranno sempre l'elemento fondamentale per la conduzione di un impianto di trasmissione.

Bibliografia

1. Contratto di servizio tra il Ministero delle comunicazioni e la RAI - Radiotelevisione Italiana S.p.A. - 23 gennaio 2003.
2. Roberto Anzelmo: "RADIOMONITORING E TELEMETRIA - Le due facce del controllo a distanza", Broadcast and Production - Maggio 2000,
3. Specifiche dei comandi e segnali per la conduzione delle stazioni" – Gruppo di lavoro per la "definizione delle specifiche di controllo delle stazioni" - Rai Radiotelevisione Italiana - Supporto Tecnico - 26/6/1985.
4. Tratta dalla presentazione STAER del SITT.
5. J. Case, M. Fedor, M. Schoffstall, J. Davin. "A Simple Network Management Protocol" (SNMP). RFC 1157 (1990).
6. D. Levi, P. Meyer, B. Steward. "SNMPv3 Applications". RFC 2263 (1998).

Il progetto POA (Piemonte On Air):
un portale regionale di servizi sulla TV digitale terrestre

ing. Gino **Alberico**
ing. Michele **Visintin**
Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica

Sommario
A seguito del lancio della Televisione Digitale Terrestre nel 2004, sono state avviate una serie di iniziative per lo sviluppo di servizi interattivi sia legati alla programmazione televisiva, sia di utilità per il cittadino in collaborazione con la Pubblica Ammnistrazione e gli Enti locali. In questo ambito, ed in considerazione della possibilità di regionalizzare la diffusione del segnale DTT, il Centro Ricerche ha avviato con la Regione Piemonte lo sviluppo del primo portale regionale trasmesso sul canale digitale terrestre. Il portale, in onda dal Febbraio 2005, comprende servizi con contenuti informativi prelevati dal sito Internet della Regione Piemonte e adattati per la fruizione tramite decoder interattivo DTT-MHP.

1. Introduzione

La Regione Piemonte, nell'ambito del "Progetto di sperimentazione, implementazione e sviluppo del digitale terrestre in Piemonte", ed in particolare nel sottoprogetto "P.O.A. – Piemonte On Air", ha stipulato nel Maggio 2004 una Convenzione con la Rai per la realizzazione di un portale di servizi interattivi in tecnologia DTT.

Obiettivo dell'iniziativa era quello di sperimentare la possibilità di veicolare una parte dei contenuti informativi presenti nel sito Internet della Regione Piemonte sui canali televisivi digitali terrestri, attraverso la realizzazione di una specifica applicazione interattiva, fruibile dai cittadini dotati di decoder DTT (o *Set Top Box*, STB) basati sulla tecnologia MHP [1] (*Multimedia Home Platform*).

Una prima versione del portale con alcuni servizi dimostrativi è stata messa in onda nel mese di Luglio 2004, nell'area coperta dal trasmettitore Rai di Torino-Eremo. Successivamente i servizi sono stati ampliati e nuovi servizi si sono aggiunti fino a completare la versione attualmente in onda da Febbraio 2005.

2. Progettazione del portale

2.1 Considerazioni preliminari

Per effettuare con successo la “conversione” di un servizio dal mondo Web al mondo della TV interattiva, occorre tener presenti alcuni vincoli derivanti dalle diverse modalità di utilizzo:

- lo schermo TV ha una definizione inferiore a quella di un monitor per PC: di conseguenza, non tutte le pagine Internet sono visualizzabili per intero, senza modifiche, in modo leggibile sul TV (specialmente se i caratteri sono molto piccoli);
- poiché la navigazione tra le pagine in TV avviene utilizzando il normale telecomando e non il mouse, i “collegamenti ipertestuali” (*link*) e i menù delle pagine Internet devono essere “trasformati” in opzioni da selezionare attraverso i tasti del telecomando (frecce, numeri, colori) ed inoltre non devono essere presenti in numero eccessivo su ciascuna pagina;
- nel caso in cui le informazioni siano molto estese (ad esempio un testo molto lungo) la visualizzazione può essere “adattata” su più pagine TV, ma occorre tener presente che la lettura, attraverso lo scorrimento sullo schermo, di un testo articolato su molte pagine è piuttosto disagevole e dovrebbe essere evitata.

Altri vincoli derivano invece dal fatto che il decoder della TV interattiva, ha minori capacità di elaborazione (CPU, memoria) di quelle di un Personal Computer, è privo di supporti di memorizzazione di massa (hard-disk, CD) ed inoltre si basa su un diverso sistema operativo:

- talvolta le informazioni reperibili sulle pagine Internet sono collegate a documenti memorizzati in molteplici formati (Word, Excel, PDF, Powerpoint, etc.) e quindi sono accessibili solo in presenza del relativo programma (o di un visualizzatore). Quasi mai è possibile “installare” tali programmi a bordo di un decoder, quindi le informazioni devono essere “convertite” (laddove possibile) in un formato “leggibile” da un’applicazione interattiva.

2.2 Tipologie di servizi interattivi

Nella fase preliminare di definizione dei servizi da sviluppare e inserire nel portale sono state identificate varie categorie di servizi, ciascuna con diverse caratteristiche e implicazioni relativamente ai processi di gestione e aggiornamento del flusso informativo.

Servizi “statici”

Servizi il cui contenuto non varia nel tempo (prevalentemente statico nell’arco di qualche mese).

- Lato Utente: interattività locale sul decoder senza l’utilizzo del modem.
- Lato Centro Servizi: l’aggiornamento dei contenuti è ottenuto di solito modificando la versione del servizio interattivo in onda dopo l’intervento di una redazione.

Servizi “dinamici” con aggiornamento via Web

Si tratta di servizi in cui le informazioni messe in onda possono essere aggiornate dinamicamente dal fornitore dei contenuti automaticamente, ogni volta che ne viene effettuata la pubblicazione su un sito Web.

- Lato utente: Interattività locale sul decoder senza l'utilizzo del modem.
- Lato Centro Servizi: aggiornamento automatico delle informazioni in onda tramite accesso diretto al sito Web contenente le informazioni.

Esempio: pagine web che forniscono informazioni variabili ma uguali per tutti gli utenti, senza personalizzare la risposta in funzione della richiesta specifica dell'utente (manifestazioni nelle maggiori città della Regione)

Servizi "dinamici" con accesso a Database

Sono simili ai precedenti, tranne che l'accesso ai dati avviene alla fonte informativa (database) che alimenta il sito Web. Rispetto al caso precedente un'eventuale rifacimento "editoriale" del sito Web, fermo restando il contenuto dei dati nel database, non dovrebbe comportare variazioni nell'alimentazione del servizio interattivo DTT.

- Lato utente: Interattività locale sul decoder.
- Lato Centro Servizi: aggiornamento automatico delle informazioni in onda tramite accesso ai database.

Esempi: servizi con icone posizionate su mappe del territorio che presentano informazioni dinamiche (informazioni sulla viabilità, meteo, ...) in un formato editoriale adattato per l'utilizzo su televisore e diverso da quello pubblicato su Web.

Servizi "interattivi" (dinamici con interattività via modem)

Servizi in cui l'utente, attraverso una connessione modem su linea telefonica, può consultare database remoti oppure ottenere l'accesso ai suoi dati personali.

- Lato utente: Interattività tramite modem su linea telefonica (o altro tipo di canale di ritorno).
- Lato Centro Servizi: deve supportare la connessione via modem degli utenti inoltrando le richieste al fornitore del servizio e le relative risposte nuovamente all'utente tramite il canale di ritorno (via modem).

Esempi: servizi di consultazione generici (orario trasporti, informazioni sulla viabilità, farmacie di turno) o personalizzati (pagamenti, richiesta certificati, prenotazione visite).

2.3 Analisi preliminare dei servizi disponibili

Al fine di selezionare i contenuti del portale DTT, sono stati analizzati i servizi disponibili sui siti web della Regione [2], cercando di individuare quelli più idonei ad essere "convertiti" per la fruizione su decoder DTT senza richiedere un'edizione specifica del contenuto.

Per ognuno dei servizi oggetto dell'analisi preliminare sono stati analizzati in dettaglio i contenuti disponibili ed in particolare:

- quantità di dati: numero di pagine, lunghezza, utilizzabilità, collegamenti con altre pagine;
- frequenza di aggiornamento dei dati (statici, dinamici, …);
- struttura dell'informazione: ipertesto, database, inserita nella grafica, ecc.

Tenendo presenti i vincoli precedentemente descritti, l'analisi preliminare dei servizi ha permesso di individuarne alcuni "trasferibili" e "adattabili" per l'utilizzo all'interno di un portale di TV interattiva. Altri servizi, seppur interessanti, sono purtroppo stati esclusi in quanto avrebbero richiesto una radicale revisione dell'impostazione edito-

riale, comportando quindi anche da parte dell'editore una lavorazione aggiuntiva, specifica per il DTT, i cui costi non erano coperti dall'iniziativa.

L'analisi preliminare ha inoltre consentito di evidenziare che, per alcuni servizi, la quantità di pagine o informazioni disponibili è eccessiva, sia rispetto alla capacità trasmissiva disponibile, sia rispetto alle possibilità di una agevole consultazione sul televisore da parte dell'utente.

3. I servizi sviluppati nel portale POA

3.1 Impostazione generale del portale

Struttura del portale POA

Particolare attenzione è stata posta nella fase di definizione della "logica di navigazione" tra le pagine e tra i diversi servizi all'interno del portale, nella scelta dei tasti utilizzati per la navigazione e nella definizione della grafica costituente l'interfaccia utente, con l'obiettivo di rendere l'applicazione facilmente utilizzabile e leggibile sullo schermo televisivo.

Il portale è organizzato in 4 sezioni, ciascuna accessibile direttamente da qualsiasi pagina tramite uno dei 4 tasti colorati presenti sul telecomando (Rosso, Verde, Giallo, Blu). Le sezioni comprendono al loro interno gruppi di servizi "omogenei" come riportato di seguito:

GOVERNO (tasto Rosso): servizio "statico" comprendente pagine con informazioni "istituzionali" relative alla Regione (Presidenza, Vice-Presidenza, Assessorati, uffici, indirizzi, numeri di telefono);

NOTIZIE (tasto Verde): servizi "dinamici" comprendenti sia pagine con le notizie pubblicate sul sito della Regione, sia pagine con informazioni meteorologiche (fornite dall'Arpa);

SERVIZI (tasto Giallo): servizio "interattivo" legato al Progetto TeleAnziani, per la richiesta, attraverso un codice personale, di servizi e/o la prenotazione di visite mediante Call Center facenti capo alla ASL 1 ed a Centri di Volontariato.

PIEMONTE EMOZIONI (tasto Blu): servizi "dinamici" comprendenti pagine relative alle manifestazioni e agli itinerari turistici in Piemonte.

Nella figura 1 è riportata la pagina iniziale con cui si presenta l'applicazione interattiva una volta lanciata (a partire dal programma RaiTre).

Albero di navigazione

I servizi all'interno delle sezioni del portale sono tutti facilmente individuabili e sono tutti raggiungibili attraverso un percorso che richiede al massimo 3 selezioni, realizzate attraverso l'uso dei tasti numerici del telecomando (solo per i servizi di TeleAssistenza sono necessari 4 passaggi per l'accesso).

Una rappresentazione semplificata dell'albero di navigazione è riportata nella figura 2, in cui sono stati omessi i "rami" di dettaglio con i contenuti specifici di ciascun servizio.

Fig. 1 - Pagina iniziale del portale POA (Piemonte-on-air).

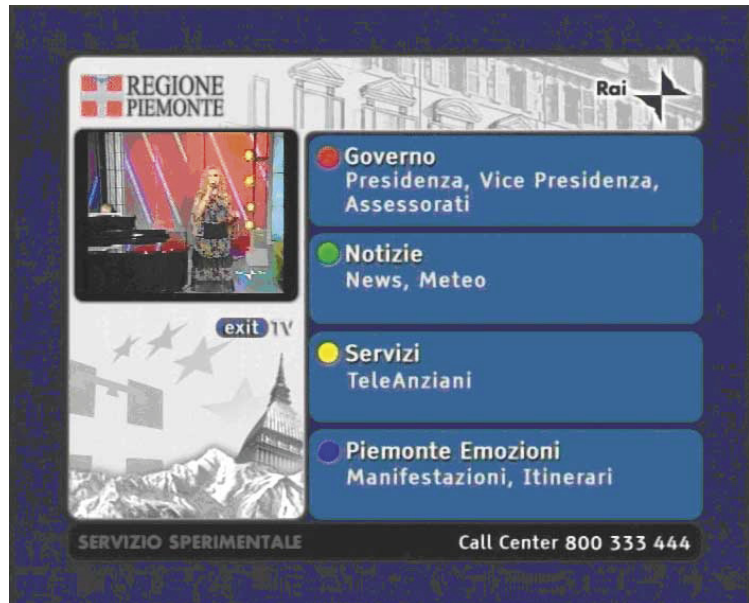
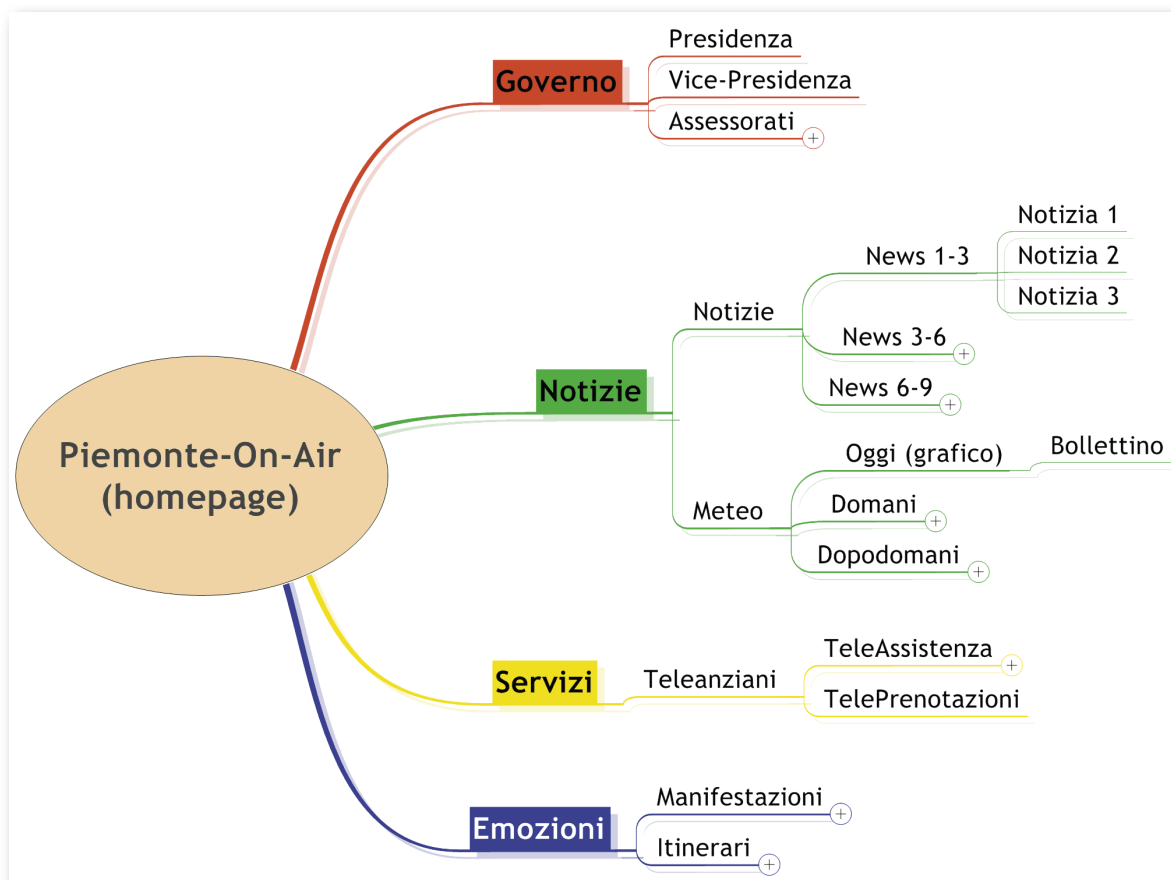



Fig. 2 - Albero di navigazione

Tab. 1 - Servizi sviluppati

Sezione (numero di pagine)	1° livello	2° livello
Governo Regionale (18)	Homepage	
	Presidenza	foto + testo
	Vice Presidenza	foto + testo
	Assessorati	foto + testo (1-13)
Notizie (90 - 95)	Notizie	News 1-9 (foto e titoli)
	Meteo	Oggi (grafica + testo)
		Domani (grafica + testo)
		Dopodomani (grafica + testo)
Servizi (20)	Tele Anziani	Tele-Assistenza
		Tele-Prenotazioni
Emozioni (130)	Manifestazioni	Cultura, Storia, Teatro, Musica, Arte, Folklore, Religione, Altro
	Itinerari	12 itinerari proposti a rotazione (3 alla settimana)

3.2 I servizi sviluppati

Sulla base delle considerazioni esposte precedentemente per la progettazione del portale, e a seguito degli accordi intercorsi con la Ragione Piemonte, si è definito lo sviluppo dei servizi riportati nella tabella 1.

Il portale si articola complessivamente su oltre 250 pagine provenienti da diverse fonti e gestite con diverse modalità di aggiornamento come riportato nella tabella 2.

Tab. 2 - Tipologia servizi, fonti e aggiornamento

Sezione	1° livello	fonte	modalità aggiornamento	frequenza aggiornamento	applicazione
Governo Regionale	Presidenza	sito WEB regionale	manuale	nessuna	statica
	Vice Presidenza				
	Assessorati				
Notizie	Notizie	sito / CSI	automatica	oraria	dinamica (da DB)
	Meteo	ARPA			
Servizi	Tele Anziani	enti e associazioni locali	manuale	n.a.	interattiva
		ASL			
Emozioni	Manifestazioni	CSI	automatica	giornaliera	dinamica
	Itinerari			rotaz. settim.	

4. Accesso al servizio e diffusione

4.1 Accesso al portale Piemonte-on-air

Per accedere alle applicazioni interattive sui canali Rai DTT è presente un'applicazione chiamata ***Launcher*** che si attiva automaticamente quando l'utente si sintonizza su un qualsiasi canale digitale Rai. Il *Launcher* è attivo in *background* e, normalmente, non si manifesta a video finchè l'utente non preme il tasto Rosso del telecomando. Il *Launcher* permette la navigazione tra i canali televisivi e contestualmente presenta all'utente i servizi interattivi disponibili in un dato momento su ogni canale.

Alcune schermate relative alle varie sezioni del portale. Dall'alto in basso: "Notizie", "Meteo", "Piemonte emozioni"

Il portale POA, è stato associato al canale televisivo RaiTre, ed è pertanto accessibile durante la visione del programma RaiTre. Premendo il tasto Rosso, nel *Launcher* vengono indicate le applicazioni interattive disponibili, come mostrato in figura 3, e, selezionando con le frecce “Piemonte On Air”, si può avviare il portale POA premendo il tasto OK del telecomando.

Fig. 3 - Accesso al portale OA dal canale RaiTre

4.2 Copertura territoriale del segnale

Per la messa in onda delle applicazioni a carattere regionale, la Rai dispone, al momento, di una frequenza sul canale 66 (UHF) irradiato dal trasmettitore di Torino Eremo. Tale trasmettitore copre la città di Torino e una parte del territorio piemontese, come indicato dalla cartina in figura 4.

In Piemonte ci sono, oltre a quelle indicate nella cartina, altre aree coperte dal servizio DTT con diversi impianti trasmittenti, che però non possono, al momento, essere agganciati ai contenuti regionali in quanto il segnale da essi irradiato copre anche il territorio lombardo.

5. Dati sull’utilizzo del servizio (rilevati dal panel Rai)

La Rai, nell’ambito di un progetto di sperimentazione ha distribuito ad un panel di utenza amica, uno speciale decoder DTT che consente di “monitorare” l’utilizzo dei servizi TV ed interattivi allo scopo di valutare il gradimento dell’offerta interattiva.

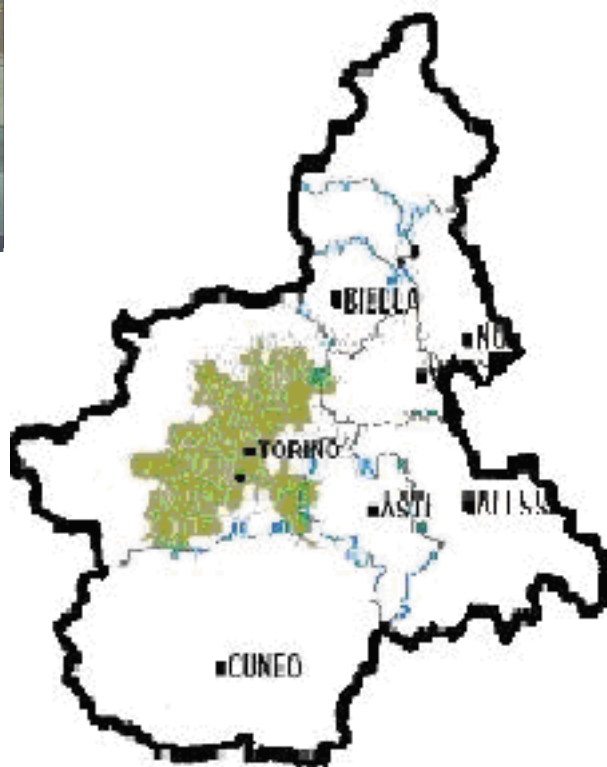



Fig. 4 - Area di copertura del servizio

Il portale di servizi POA è accessibile da tutti gli utenti dell'area torinese equipaggiati con decoder DTT. Il tracciamento dei dati è attivo dal mese di Gennaio 2005 ed ha, inizialmente, riguardato esclusivamente l'accesso all'applicazione interattiva del portale. Successivamente, dal mese di Aprile 2005, è stato introdotto anche il tracciamento della navigazione nelle 4 sezioni del portale contraddistinte dai tasti colorati (Governo, Notizie, Servizi, Emozioni).

Nel seguito vengono riportate alcune valutazioni dell'utilizzo del portale suddivise per periodi, per sezioni e complessive. I dati presentati sono estrapolati al bacino di utenza digitale piemontese, ipotizzando che rispetto al totale dei decoder venduti in Piemonte (dati riferiti a Giugno 2005) circa metà siano installati nell'area di copertura del segnale digitale del Mux-A. Si tratta di un'ipotesi piuttosto "conservativa", pertanto si può ritenere che i risultati riportati siano una stima approssimata per difetto.

5.1 Accesso al portale

I dati di accesso al portale Piemonte-on-air, espansi alla popolazione piemontese, sono riportati nelle tabelle e nei grafici seguenti.

Nelle colonne delle tabelle sono riportati:

- **Numero di visite al portale**: rappresenta il numero di accessi effettuati nel periodo da parte di singoli decoder;
- **Contatti netti**: rappresenta il numero di individui **diversi** che hanno effettuato un accesso al portale;
- **Contatti lordi**: rappresenta il numero totale di individui "esposti" al portale durante tutti gli accessi;
- **Tempo medio**: indica per quanto tempo (mediamente) gli utenti hanno navigato all'interno del portale;
- **Frequenza**: è il rapporto tra "Contatti lordi" e "Contatti netti" e indica quante volte (in media) ogni diverso individuo è tornato a utilizzare il portale.

Nella Tabella 3 è riportato il dato cumulativo relativo a tutto il periodo di disponibilità dei dati provenienti dal panel (Gennaio - Giugno 2005).

Il portale POA, è stato associato al canale televisivo RaiTre, ed è pertanto accessibile durante la visione del programma RaiTre. Premendo il tasto Rosso, nel *Launcher* vengono indicate le applicazioni interattive disponibili, come mostrato in Figura 3, e, selezionando con le frecce "Piemonte On Air", si può avviare il portale POA premendo il tasto OK del telecomando.

Tab. 3 - Accessi totali al portale POA

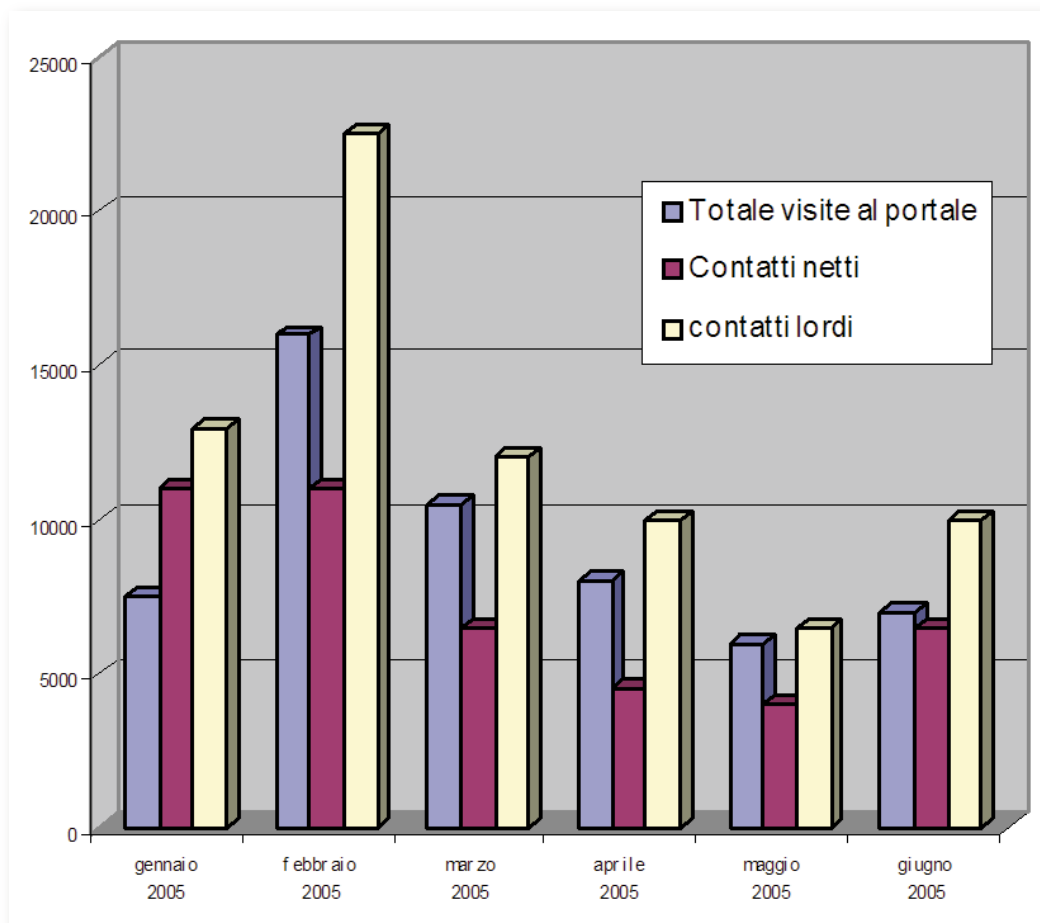
Periodo	Totale visite al portale	Contatti netti	Contatti lordi	Tempo medio (secondi)	Frequenza
1/1/2005 – 30/6/2005	56 000	26 000	75 500	160	2.9

L'analisi dei dati non può prescindere dalle considerazioni seguenti: il servizio DTT è ancora nella fase di avvio, la penetrazione dei decoder sul mercato è ancora piuttosto bassa (circa il 10% delle famiglie) ed inoltre l'abitudine all'utilizzo dei servizi interattivi e la conseguente alfabetizzazione degli utenti sono ancora in una fase di immaturità.

Con queste premesse, il numero di visite al portale (56 000) nell'arco dei 6 mesi di osservazione si può considerare piuttosto significativo, così pure il numero di individui diversi che hanno fatto accesso almeno una volta (26 000). E' interessante anche osservare che il tempo di utilizzo si aggira fra i 2 e i 3 minuti e che, in media, gli utenti sono ritornati a utilizzare il servizio circa 3 volte.

5.2 Accesso al portale: dettaglio sui servizi

Per ricavare maggiori informazioni utili all'analisi del comportamento e del gradimento da parte degli utenti, sono stati successivamente inseriti nelle pagine dell'applicazione interattiva opportuni codici per il tracciamento dell'accesso non solo al portale ma anche alle diverse sezioni (Governo, Notizie, Servizi, Emozioni).

Fig. 5 - Grafico accessi al portale (su base mensile)

I dati di navigazione nelle quattro sezioni, disponibili a partire da aprile, sono riportati in tabella 4.

L'analisi specifica dei singoli servizi mostra come la sezione più visitata (sia in termini di numero di accessi, sia come contatti netti) è la sezione "**Notizie**", comprendente al suo interno sia le News (dal sito web della Regione) sia il servizio Meteo (a cura dell'ARPA) con le previsioni del tempo. Segue, per numero di accessi e contatti netti, la sezione relativa a "**Piemonte Emozioni**".

6. Evoluzione del portale

In un'ottica di evoluzione del portale, si potrebbe ipotizzare un ampliamento delle "aree informative" come quelle presenti nelle sezioni NOTIZIE ed EMOZIONI. Visto l'elevato interesse manifestato dagli utenti nei confronti dei servizi di **News** e **Meteo** quest'area potrebbe essere arricchita con nuovi servizi ad esempio costituiti da (ciascuno per il periodo stagionale di rilievo):

- bollettino Neve e/o situazione valanghe;
- situazione pollini;
- segnalazione "Rischio calore" (Protezione Civile);
- informazioni sui trasporti e traffico (ripristino di Viabilità).

Si potrebbero inoltre ipotizzare ulteriori evoluzioni del portale grazie allo sfruttamento di nuove infrastrutture e tecnologie, quali ad esempio la disponibilità di un Centro Servizi per l'interattività e l'introduzione di Carte Servizi Nazionali (CNS) e Regionali.

Il Centro Servizi, che Rai sta sviluppando e che sarà operativo dall'inizio del 2006, potrà gestire servizi interattivi con utilizzo del canale di ritorno (via modem) da parte di un numero anche molto elevato di utenti. Inoltre il Centro Servizi permetterà la creazione di nuovi servizi e modelli di business multi-piattaforma, per esempio integrando traffico dati DTT, SMS da e verso operatori mobili, o transazioni per il pagamento.

Un esempio tipico potrebbe essere quello in cui l'utente, che ha effettuato attraverso il portale DTT alcune operazioni (prenotazione di una visita, acquisto, ecc.), riceve una conferma del corretto completamen-

Tab. 4 - Accesso alle sezioni del portale

Periodo	Totale visite al portale	Contatti netti (individui)	Contatti lordi	Tempo medio (secondi)	Frequenza
complessivo (6/4/05 - 30/6/05)	**18 500**	**8 500**	**22 500**	**161**	**2.6**
Homepage	17 500	8 000	19 500	21	2.4
Governo	3 500	1 500	3 000	22	2.0
Notizie	15 000	5 000	15 500	88	3.1
Servizi	4 500	2 000	4 000	133	2.0
Emozioni	6 000	4 000	6 500	94	1.6

to della transazione attraverso un SMS (oppure email) e potrebbe inoltre ricevere (sempre via SMS) un promemoria alla scadenza (quando e dove presentarsi alla visita).

Un'altra tecnologia abilitante per una famiglia di nuovi servizi è la tecnologia delle carte elettroniche (*smart-card*) per i servizi al cittadino (Carta Nazionale Servizi, CNS o equivalenti Carte Regionali) già in distribuzione in alcune Regioni, come ad esempio in Lombardia. La smart-card, in abbinamento ai decoder interattivi DTT, apre la strada a tutta una serie di nuovi servizi oggi non disponibili neanche attraverso Internet (poiché sul PC di solito non esiste un lettore di smart-card).

A questo riguardo, sono già stati sviluppati diversi applicativi dimostrativi che mostrano le potenzialità di utilizzo di una Carta Servizi CNS (smart-card) utilizzata in un decoder DTT. Innanzitutto l'uso della carta semplifica le operazioni di immissione dei dati normalmente richiesti per l'accesso ad un servizio: invece di digitare il proprio nome con il telecomando è sufficiente inserire la carta nel decoder. Inoltre la carta (con la digitazione del PIN ad essa associato) permette di autenticare in modo univoco e sicuro l'utente e quindi di aprire l'accesso a servizi in cui si processano dati personali. Infine, grazie all'autenticazione supportata dalla carta CNS, il decoder DTT potrebbe diventare uno strumento per effettuare pagamenti (tasse, imposte, multe) in maniera più semplice e sicura rispetto ad Internet (non occorre inserire ad esempio il numero della propria carta di credito).

7. Conclusioni

Con la realizzazione del portale per la Regione Piemonte il Centro Ricerche, oltre a mettere a frutto le proprie conoscenze nello sviluppo di applicazioni interattive MHP, ha acquisito competenze nell'area dei servizi al cittadino erogabili dalle Amministrazioni Pubbliche locali. L'esperienza maturata ha facilitato la preparazione dei progetti per la partecipazione ai bandi FUB (Fondazione Ugo Bordoni) e CNIPA (Centro Nazionale per Informatica nella Pubblica Amministrazione) per lo sviluppo di servizi di T-government.

Lo sviluppo dell'interfaccia grafica e di alcune parti dell'applicazione interattiva è stato realizzato con la collaborazione di Lumiq Studios [3].

Gli autori desiderano ringraziare i colleghi del Centro Ricerche che hanno contribuito alla realizzazione del progetto, in particolare Andrea Vecchiattini per lo sviluppo dell'applicazione e Mauro Rossini, Luca Vignaroli per il prezioso supporto tecnico.

Riferimenti bibliografici

1. ETSI TS 101 812 - Digital Video Broadcasting DVB); Multimedia Home Platform (MHP) specification 1.0.3 – v.1.3.1 (2003-06)
2. Sito della Regione Piemonte: www.regione.piemonte.it ; Sito di Piemonte Emozioni: www.piemonte-emozioni.it
3. www.lumiq.com

La Televisione Digitale Terrestre, a due anni dall'avvio

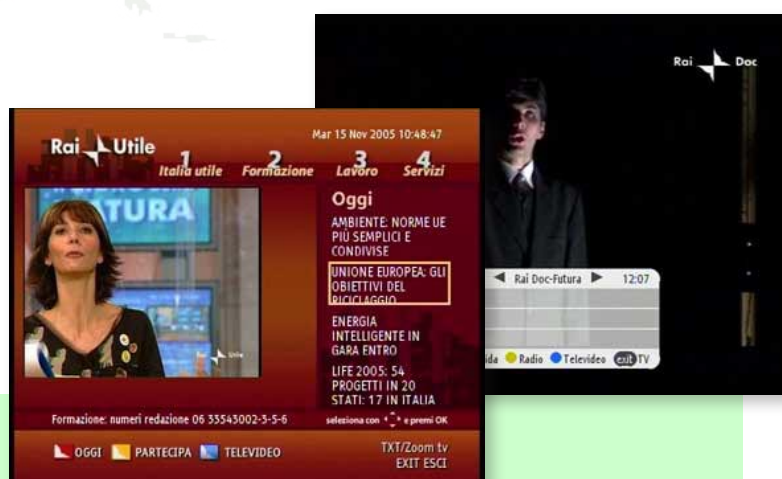
MB&NS

Una breve descrizione della DTT, la televisione digitale terrestre, a due anni dall'avvio del servizio in Italia, dove sono ormai tre milioni le famiglie dotate del set-top-box interattivo.

L'avvio

Il 3 gennaio 2004, esattamente 50 anni dopo l'inizio della televisione in Italia, la Rai ha avviato ufficialmente le trasmissioni della televisione digitale terrestre.

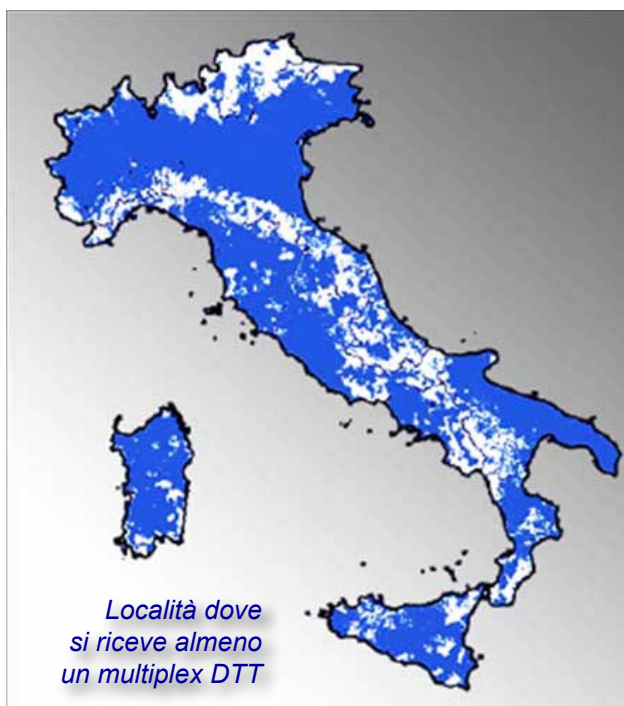
La televisione digitale terrestre DTT (dall'acronimo in lingua inglese *Digital Terrestrial Television*) affianca il servizio analogico, che continua ad essere erogato poiché utilizza canali differenti, e consente di fruire, nel caso della Rai, di due insiemi (denominati *multiplex* o *bouquet)* di programmi.

I *bouquet* oltre ai programmi presenti sulle reti analogiche televisive, radiofoniche e della filodiffusione (RaiUno, RaiDue, RaiTre, Televideo, Radio1, Radio2, Radio3 e FDAuditorium) offrono una programmazione aggiuntiva (RaiUtile, Rai Doc-Futura, RaiNews24, RaiEdu1).

Rai Utile è nato per rispondere ai bisogni dei cittadini. Cinque grandi aree tematiche scandiscono la settimana: consumi, ambiente, lavoro, famiglia e cultura- tempo libero. Al suo interno RaiUtile propone i servizi realizzati da "TelePA" con gli aggiornamenti sui principali fatti della Pubblica Amministrazione.

Rai Doc-Futura è il nuovo canale digitale della Rai dedicato all'intrattenimento culturale e alla sperimentazione: ogni giorno il canale propone ai propri telespettatori una programmazione in cui l'arte, la fantasia e lo spettacolo sono i protagonisti principali.

La versione interattiva di **Rai News 24** ha la stessa grafica del canale televisivo satellitare, con l'aggiunta di menu che permettono di navigare approfondimenti o usufruire di nuovi servizi. Poche facili operazioni per attivare l'elenco delle news e le foto del giorno, scorrere la rassegna stampa, leggere gli approfondimenti della rubrica libri, ecc.

Rai Edu 1 è il canale di Rai Educational dedicato alla formazione scolastica, in particolar modo alla didattica dell'inglese per i bambini delle scuole elementari e alla diffusione delle unitá audiovisive di MEDITA, la Mediateca Digitale Italiana, dedicate alle scuole di ogni ordine e grado.

Località dove si riceve almeno un multiplex DTT

Nel secondo anno dall'avvio sono presenti sull'intero territorio nazionale 7 multiplex. Vi sono inoltre numerosi multiplex locali che trasmettono solo in alcune ore (generalmente nelle ore notturne). In buona parte del territorio nazionale è ricevibile almeno un multiplex, assicurando a più del 70% della popolazione l'accesso al servizio.

Quasi tre milioni di famiglie hanno acquistato un decoder DTT abilitato alle funzioni interattive.

La TV digitale

La catena che porta l'informazione televisiva nelle nostre case ha iniziato il processo di digitalizzazione a partire dagli anni '80. E' del 1982 la norma internazionale (ITU-R BT.601) che specifica i parametri per la codifica digitale del segnale video utilizzato nella produzione televisiva: il primo passo verso un'unificazione dei diversi standard che fino ad allora avevano costituito una importante barriera tecnica alle comunicazioni a livello globale.

Negli anni successivi le attività di ricerca ed i progressi nelle tecniche di compressione dei segnali video e audio hanno permesso di trasmettere o registrare queste informazioni, riducendo sempre più la capacità richiesta ai canali e la sensibilità agli errori da essi introdotti.

Fondamentale fu l'approvazione dello standard MPEG-2 video nel 1995. Da quel momento il video digitale inizia ad entrare nelle case, sotto forma di DVD (*Digital Versatile Disc*) e di DTV (*Digital TeleVision*). In Europa l'artefice dello sviluppo della televisione digitale è il DVB (*Digital Video Broadcasting*) che, a partire dall'anno della sua fondazione ufficiale (1993) ha definito

e promosso diversi standard fra cui: DVB-S (per la diffusione via satellite), DVB-C (distribuzione via cavo), DVB-T (diffusione terrestre) e MHP (*Multimedia Home Platform*).

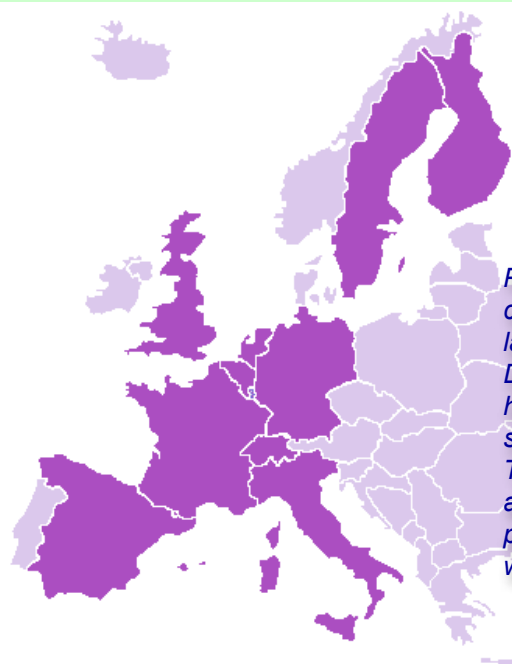
La DTT si basa proprio su questi ultimi due standard, DVB-T e MHP, che costituiscono i fondamenti tecnologici per le caratteristiche innovative della TV digitale terrestre rispetto alla tradizionale TV analogica:

- ◊ adozione di un sistema di trasmissione numerico che permette un miglioramento nello sfruttamento dello spettro elettromagnetico, nella qualità dell'immagine e del suono, una riduzione dell'inquinamento elettromagnelico
- ◊ l'interattività, ovvero la possibilità da parte dell'utente di interagire con i contenuti dei programmi televisivi o altri tipi di dati, che possono essere o meno associati al programma. Un canale di ritorno, ad esempio un modem telefonico, permette di mettere in comunicazione l'utente con il fornitore del programma.

La Rai, attraverso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica, ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB. Il numero di aprile 2002 di Elettronica e Telecomunicazioni è interamente dedicato allo standard DVB-T e alle attività di ricerca e sperimentazione svolte: la diffusione DTT in Italia inizia nel 1998 dal trasmettitore Torino-Eremo.

A casa dell'utente

Il segnale digitale viaggia sfruttando l'etere e occupa le stesse bande di frequenza già utilizzate per la TV analogica: è quindi possibile la ricezione con gli attuali impianti d'antenna, se realizzati secondo le norme.

E' invece indispensabile dotarsi di un terminale d'utente specifico per la DTT. L'apparato più comune, al momento, è un ricevitore-decodificatore integrato (IRD, *Integral Receiver and Decoder*) o STB (*Set-Top-Box*) che va collegato al televisore tradizionale mediante l'interfaccia

Paesi in Europa che hanno lanciato servizi DTT e paesi che hanno adottato lo standard DVB-T, molti hanno avviato progetti pilota (fonte www.digitag.org).

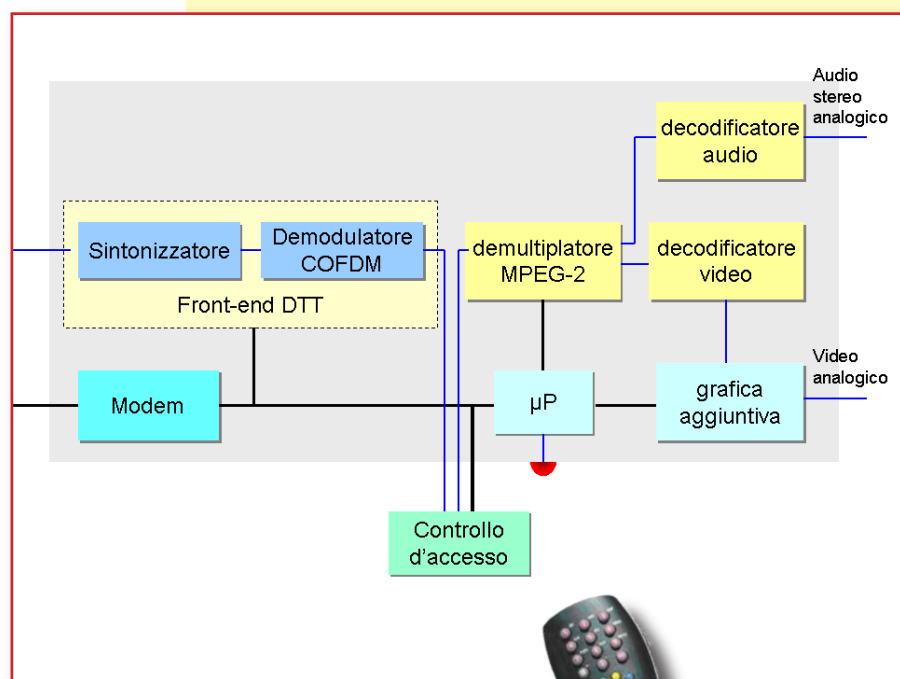
MHP è uno standard definito a livello europeo (dall'ETSI, *European Telecommunication Standard Institute*) e quindi una applicazione, scritta da un produttore di software in base alle specifiche, può essere eseguita da tutti i STB prodotti dalle diverse industrie. La situazione è completamente diversa da quella normalmente adottata nella TV satellitare, dove si adottano piattaforme proprietarie e, per poter utilizzare l'interattività, il STB deve essere quello fornito dall'operatore TV con cui è stato stipulato il contratto di fornitura.

Il cuore della specifica MHP è la macchina virtuale Java, che fornisce anche gli elementi base di sicurezza. Nelle specifiche MHP sono presenti tutti i meccanismi necessari per poter disporre di applicazioni "firmate" e quindi sicure.

La piattaforma multimediale domestica MHP consente l'accesso ad un'ampia gamma di servizi che possono essere caratterizzati attraverso tre profili.

Il profilo 1, Enhanced Broadcasting 1 (EB1) (ossia di radiodiffusione avanzata) offre concrete possibilità di arricchire i servizi televisivi diffusivi unidirezionali di base con contenuti multimediali (clip audio, immagini, finestre di testo, animazioni, ecc.), eventualmente sincronizzati con il programma in onda, e di trasmettere servizi "datacast" e applicazioni come enhanced teletext e sottotitoli, canali guida elettronici evoluti e giochi memorizzandoli nel terminale di utente.

Il profilo 2, Interactive Broadcasting 1 (IB1) (ossia di radiodiffusione interattiva) aggiunge al precedente la possibilità per l'utente di interagire con il Centro Servizi attraverso un canale di ritorno consentendo l'introduzione di servizi bidirezionali ad esempio il televoto, i quiz, la pubblicità interattiva, l'home-banking, e il commercio elettronico.

Il profilo 3, Internet Access 1 (IA1, ossia di accesso Internet) offre la possibilità di accedere a servizi del tipo Internet (navigando su contenuti web) e consente di effettuare vere e proprie transazioni commerciali, tipiche degli attuali servizi di e-commerce, sfruttando i protocolli di sicurezza già presenti nel mondo Internet.

Schema semplificato di un STB. Il dispositivo è in grado di sintonizzare il canale, demodulare il segnale COFDM, estrarre dal multiplex e decodificare i dati video e audio MPEG-2, inviare al televisore i segnali analogici video e audio per mezzo dell'interfaccia SCART. E' dotato di telecomando a infrarossi e di interfaccia per consentire l'accesso condizionato (CA, *Coditional Access*). Nel contesto DTT italiano le soluzioni CA sono di tipo *embedded software*, prevedono che il STB ospiti al suo interno il codice software per consentire la distribuzione a pagamento dei programmi, in modalità *pay-per-channel*, *pay-per-view* o *pay-per-event*. MHP prevede di avere disponibile una connessione IP (*Internet Protocol*) con il mondo esterno. I STB attuali utilizzano un modem su via telefonica, ma sono possibili anche collegamenti GPRS e, in futuro, ADSL.

SCART di cui sono dotati. Gli apparecchi televisivi che integrano la capacità di decodificare i segnali digitali, oltre a quelli analogici, sono denominati iDTV (*integrated Digital TeleVision*).

Tutti i telecomandi presentano la stessa disposizione dei tasti e integrano in un solo dispositivo la possibilità per il telespettatore di effettuare azioni che oggi prevedono invece il ricorso a strumenti differenti (telefono, computer, posta, ecc.).

Ad esempio è possibile, attraverso il telecomando, oltre a selezionare i singoli programmi:

- partecipare a votazioni e sondaggi, che hanno effetto anche sulla dinamica del programma, supplendo in tal modo alla funzionalità oggi espletata via telefono;
- ottenere informazioni aggiuntive relative ai protagonisti, o resoconti sulle passate vicende che li hanno interessati, con una modalità similare all'accesso via Internet;
- giocare con quiz e test relativi al programma o alle tematiche ad esso legate, entrare in collegamento con la comunità del pubblico del programma in una *chat* (scambio di messaggi tramite TV e telecomando);
- acquistare prodotti collegati al programma.

La navigazione è infine agevolata dall'associazione tra i contesti tra cui il telespettatore può muoversi ed i corrispondenti colori dei tasti del telecomando; ciò avviene senza perdere contatto col programma stesso, il cui video viene ridimensionato, o integrato alla grafica in sovra-impressione.

Le tecnologie

Le tecnologie sottostanti alla DTT sono moderne, ma allo stesso tempo collaudate e quindi "sicure". Il STB è complesso, di una complessità simile a quella del PC, ma è stato progettato per sostituire nelle case il televisore, un "elettrodomestico" con cui siamo abituati a convivere, senza

Esempi di Televideo, guida elettronica ai programmi (EPG, *Electronic Programme Guide*), televoti e sondaggi, approfondimenti correlati al programma.

le incompatibilità *hardware* e *software* che subiamo, e in parte siamo disposti ad accettare, quando usiamo un PC.

Il sistema di modulazione adottato è denominato COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), sviluppato, a partire dagli anni '80, per consentire la ricezione anche in condizione di riflessioni multiple, ad esempio nelle città, per la presenza di palazzi, o in zone collinari o montagnose.

Grazie a sistema di modulazione, sistema di multiplazione e codifica MPEG-2, tecniche di correzione e mascheramento degli errori, è possibile fruire del programma anche in condizioni di propagazione difficili e, a parità di area di copertura, un trasmettitore digitale richiede una potenza notevolmente inferiore ad un trasmettitore TV analogico.

Le applicazioni interattive sono "sicure" al fine di consentire applicazioni di *T-commerce* e T-*banking*.

L'evoluzione

La diffusione televisiva terrestre era l'ultima maglia analogica di una rete digitale. Una rete sempre più capillare e complessa, basata sull'informatica e le telecomunicazioni. Il problema non era quindi se anche questa maglia sarebbe diventata digitale, ma quando e come.

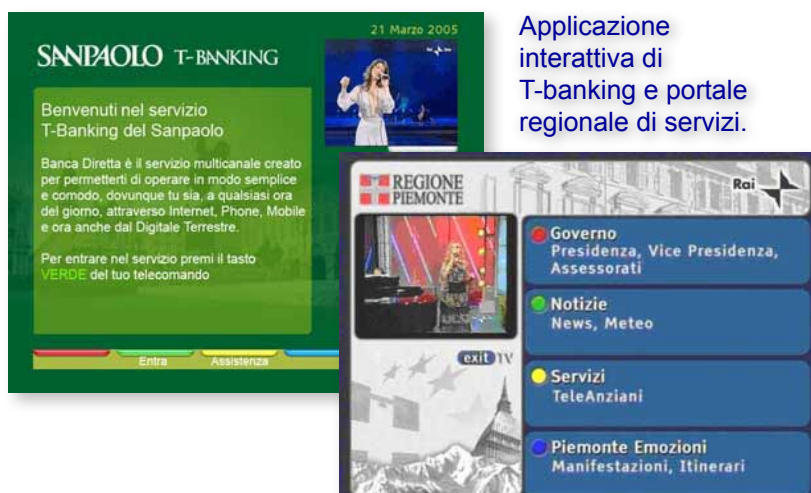
In Italia si è scelto di favorire una rapida diffusione di STB evoluti, in modo da consentire lo sviluppo di applicazioni interattive, per facilitare l'accesso a servizi che altrimenti richiederebbero l'uso di un PC e discrete conoscenze informatiche.

Si è scelto di utilizzare standard di tipo *open*, per favorire il più ampio accesso ai fornitori di contenuti e di servizi.

La televisione analogica ha percorso il suo ciclo evolutivo: dal bianco/nero al colore, l'introduzione del suono stereo e dei dati con il televideo. La DTT ha un punto di partenza tecnologicamente elevato e davanti a sè ha prospettive enormi di evoluzione.

In questi anni abbiamo già assistito ad alcuni sviluppi, per esempio alla introduzione di servizi *pay-per-view*.

Alcuni prevedono che STB in grado di registrare i programmi (PVR, *Personal Video Recorder*) diventeranno il "baricentro" dell'intrattenimento domestico. Permetteranno di selezionare, utilizzando la guida elettronica ai programmi EPG o tramite la connessione di ritorno, i programmi preferiti e fruirli con i tempi e le modalità preferite.

Siamo abituati ad una evoluzione rapida nel campo dell'informatica e delle telecomunicazioni, fisse e mobili. Sviluppi analoghi sono già all'orizzonte anche per la TV: l'alta definizione e la televisione mobile.

Applicazione interattiva di T-banking e portale regionale di servizi.

Che cosa è, come funziona:
La modulazione COFDM

ing. Vittoria **Mignone**
Rai
Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica

La modulazione COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)[Nota 1] è una tecnica di trasmissione caratterizzata dalla suddivisione del segnale di informazione ad alta velocità trasmissiva in molti flussi paralleli trasmessi a bassa velocità, multiplati a divisione di frequenza (FDM, *Frequency Division Multiplexing*) su portanti ortogonali e quindi non interferenti fra loro.

Seppure la prima pubblicazione relativa alla modulazione multiportante risalga agli anni '60, solo a partire dagli anni '80, con l'evoluzione delle tecnologie digitali, l'OFDM si è rivelato interessante per le trasmissioni su canali caratterizzati da selettività in frequenza, fino all'adozione per gli standard di diffusione radio DAB, TV DVB-T, su rame (ADSL) e per reti wireless (WiFi e WiMAX) (vedere riquadro).

Nota 1 - Talvolta è chiamata DMT (*Discrete Multi-Tone*).

ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) per la trasmissione dati su doppino in rame è basato sugli standard ITU G.991 e G.992, noti anche come G.DMT e G.lite.

DAB (*Digital Audio Broadcasting),* tecnologia per la diffusione digitale dei programmi audio, sviluppata dal progetto europeo Eureka 147, iniziato nel 1987 e concluso nel 2000. (www.worlddab.org e www.dab.it).

DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), è lo standard per la diffusione digitale terrestre (www.dvb.org).

WiFi (*Wireless Fidelity*) e WiMAX è un marchio della *WiFi Alliance* e si riferisce ad una famiglia di specifiche IEEE 802.11 per i metodi e le tecniche per operare senza fili (wireless) in reti locali. Le specifiche di IEEE 802.11b sono del 1999.

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) è un marchio che certifica i prodotti conformi allo standard IEEE 802.16, per l'accesso wireless punto-multipunto a larga banda. (www.wimaxforum.org)

Nota 2 - Le reti a singola frequenza sono reti in cui il segnale irradiato dai trasmettitori che compongono la rete è sulla stessa portante radio: i ricevitori possono perciò ricevere i segnali provenienti da più trasmettitori, echi artificiali di uno stesso segnale.

L'ambiente terrestre è caratterizzato dalla cosiddetta propagazione *multipath*, ossia multi-cammino, dovuta alle riflessioni del segnale da parte degli ostacoli che incontra nel viaggio dal trasmettitore al ricevitore: al ricevitore arrivano perciò più repliche del segnale trasmesso, attenuate, sfasate e ritardate in modo diverso a seconda del tragitto percorso. I ritardi rispetto al segnale principale possono essere di alcuni microsecondi, nel caso di echi naturali, legati all'ambiente di propagazione, ma possono anche arrivare a centinaia di microsecondi per echi artificiali dovuti ai segnali provenienti dai trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti a singola frequenza[Nota 2].

Fig. 1 - Canale *multipath* e modulazione multiportante.

Il risultato è un pesante degradamento del segnale trasmesso: in figura 1 è rappresentata la funzione di trasferimento di un tipico esempio di canale di propagazione in ambiente urbano nella banda UHF in presenza di soli echi naturali con ritardi fino a 5,5 μs: come si può vedere un segnale convenzionale a singola portante con una velocità di simbolo R_s di 7,5 MHz occupante l'intera porzione di spettro risulta fortemente deteriorato dalla presenza degli echi del segnale principale, che hanno ritardi con durata molto maggiore di quella del simbolo in trasmissione $T_s=1/R_s$,pari a 0,13 μs.

Le tecniche di correzione del *multipath* per la modulazione a portante singola convenzionali si basano sull'equalizzazione del segnale al ricevitore. Diverse sono le strutture secondo cui gli equalizzatori possono essere realizzati, ma le più adottate si basano su linee a prese di ritardo di tipo FIR (*Finite Impulse Response*, a risposta finita) a coefficienti adattabili, con spaziatura tra le prese di ritardo pari al periodo di simbolo del segnale in trasmissione. Per un corretto funzionamento la lunghezza dell'equalizzatore deve essere maggiore del massimo ritardo d'eco da equalizzare (più volte il ritardo massimo, tanto più quanto maggiore è la potenza dello stesso, riferita al segnale principale). Ne risulta che ritardi molto lunghi rispetto al periodo di simbolo del segnale non possono essere trattati con le tecniche di equalizzazione convenzionali, perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto complessi.

Sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche

Fig. 2 - Il segnale OFDM nel dominio del tempo e della frequenza.

comparative, nel caso di sistemi di trasmissione per canali affetti da *multipath* elevati, si è scelta la modulazione multiportante OFDM. Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione.

La figura 2 mostra il segnale OFDM nel dominio del tempo e della frequenza: se f_0 è la spaziatura in frequenza delle portanti, il segnale OFDM è la somma risultante dalla multiplazione a divisione di frequenza di N segnali con portanti 0, f_0, $2f_0$,…., $(N-1)f_0$. A ciascuna delle portanti è poi applicata la modulazione digitale (QPSK, M-QAM, ecc.); la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$.

Il processo OFDM è attuato per mezzo di una trasformata di Fourier Inversa (I-FFT, *Inverse Fast Fourier Transform*).

L'effetto di un eco sul segnale OFDM è schematicamente rappresentato in figura 3, paragonato con il caso di un segnale a singola portante: un eco con ritardo confrontabile con la durata del simbolo di trasmissione della modulazione a singola portante (SP) ha effetto sull'intero simbolo del segnale SP, ma solo su una piccola porzione del simbolo del segnale multiportante (MP).

Nel dominio della frequenza ciò si traduce nel fatto che ogni portante occupa una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è tanto più "localmente piatta" e non distorcente quanto più è elevato il numero di portanti in cui è suddiviso il segnale da trasmettere (si veda l'ingrandimento in figura 1): idealmente suddividendo il segnale in un numero infinito di portanti, ogni singola portante accede ad un canale non distorcente.

Nella realtà una porzione del segnale OFDM è comunque affetta da interferenza intersimbolica, ossia interferenza sul

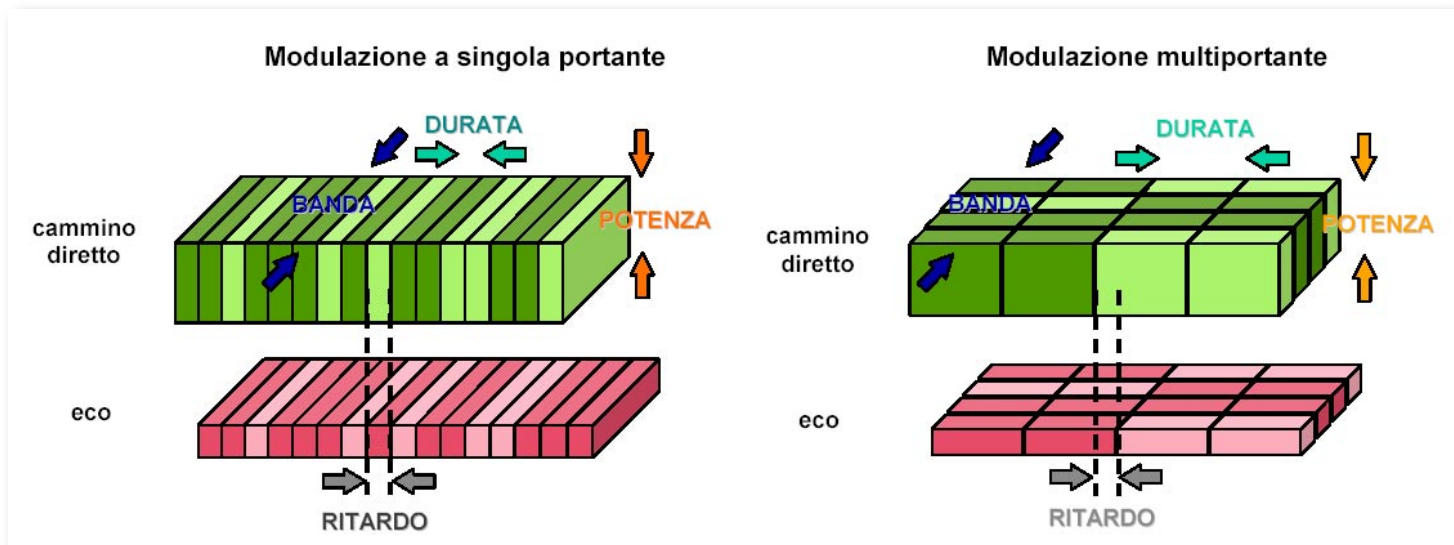



Fig. 3 - Confronto fra la modulazione a singola portante e quella multiportante.

simbolo utile dovuta ai simboli che lo precedono (figura 4): per eliminarla, a ciascun simbolo OFDM è anteposto un intervallo di guardia temporale (con durata T_g pari ad una frazione della durata di simbolo utile T_u) che separa simboli OFDM adiacenti. L'intervallo di guardia è la continuazione ciclica della parte utile T_u del simbolo (figura 5) e viene scartato dal ricevitore, cosicché gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo τ inferiore a T_g non generano interferenza intersimbolica (*Inter Symbol Interference*: ISI). Ovviamente l'intervallo di guardia riduce l'efficienza del sistema in termini di capacità trasmissiva.

Oltre che dall'interferenza intersimbolica, il segnale OFDM è anche affetto da inter-

Fig. 4 - Interferenza intersimbolica ed intrasimbolica.

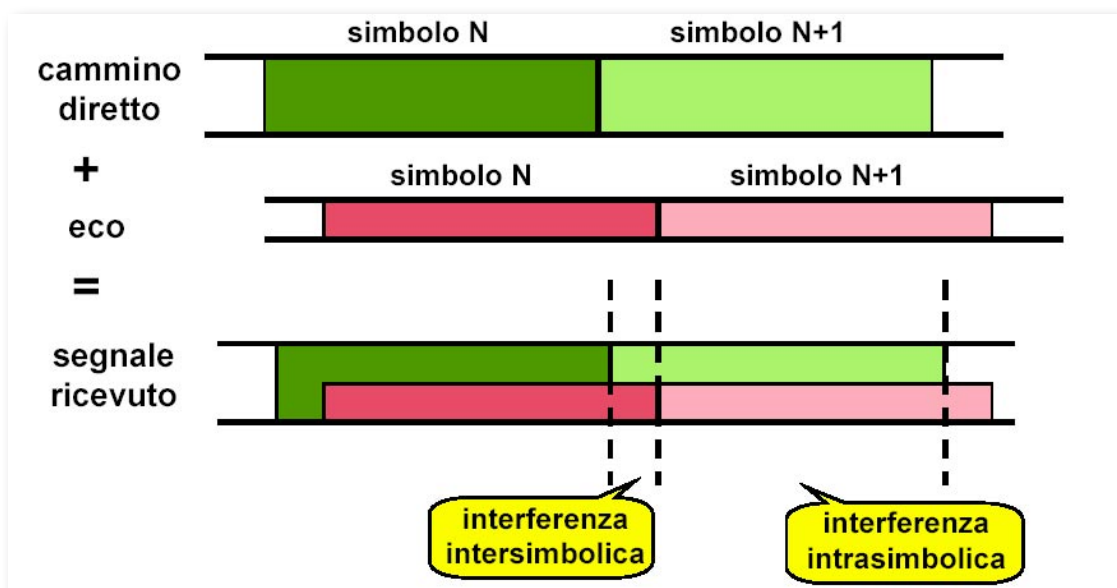
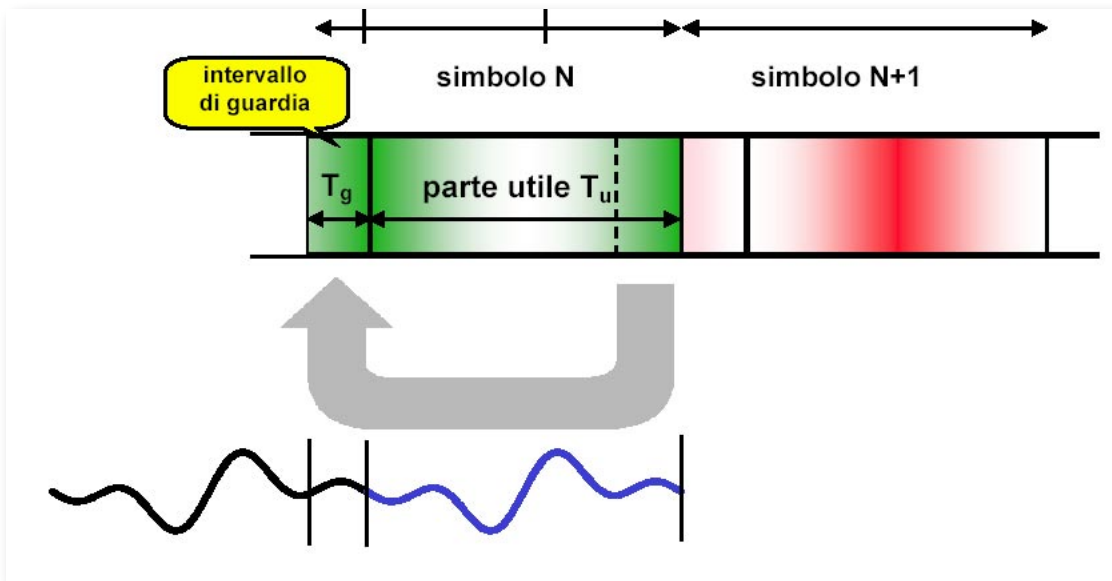



Fig. 5 - Il simbolo OFDM e l'intervallo di guardia.

ferenza intrasimbolica, ossia l'interferenza sul simbolo utile dovuta al simbolo stesso (figura 4). Essa può essere costruttiva, ossia aumentare la potenza di segnale al ricevitore, o distruttiva, ossia diminuire la potenza ricevuta, a seconda del ritardo tra segnale principale ed eco. La figura 6 illustra l'effetto dell'interferenza intrasimbolica su una portante del segnale OFDM.

Per mitigare gli effetti dell'interferenza intrasimbolica, che causa un'alterazione del livello e della fase delle singole costellazioni, viene utilizzato un equalizzatore adattativo che portante per portante, mediante una stima della funzione di trasferimento del canale, corregge modulo e fase del segnale ricevuto (figura 7); inoltre è prevista l'introduzione di uno schema di correzione degli errori esternamente alla modulazione OFDM, per permettere il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state attenuate dal canale di trasmissione. Per questo motivo normalmente si parla di COFDM (*Coded* OFDM), ossia OFDM codificato.Inoltre, per evitare che l'informazione trasportata dalle portanti degradate entri nel decodificatore sequenzialmente, normalmente al codificatore è associato un interallacciatore con il compito di sparpagliare il flusso di informazione codificata, prima che venga associato alle portanti della modulazione OFDM. Come illustrato in figura 8, in trasmissione dopo la codifica di canale l'interallacciatore

Fig. 6 - Effetto dell'interferenza intrasimbolica su una portante del segnale OFDM: casi limite.

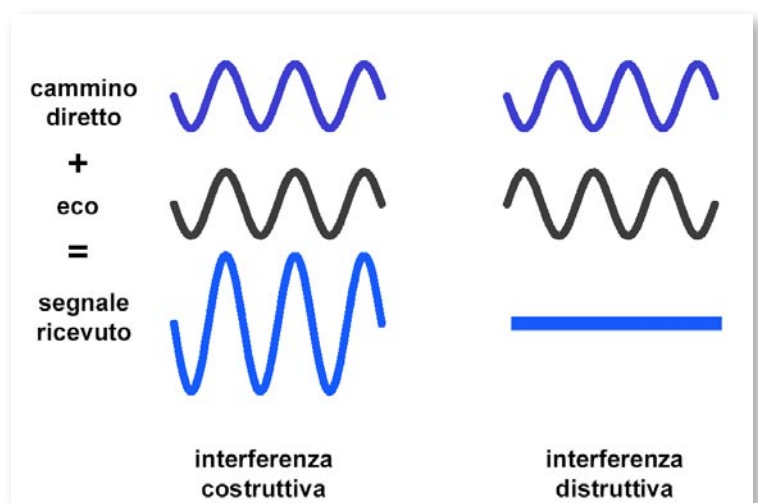



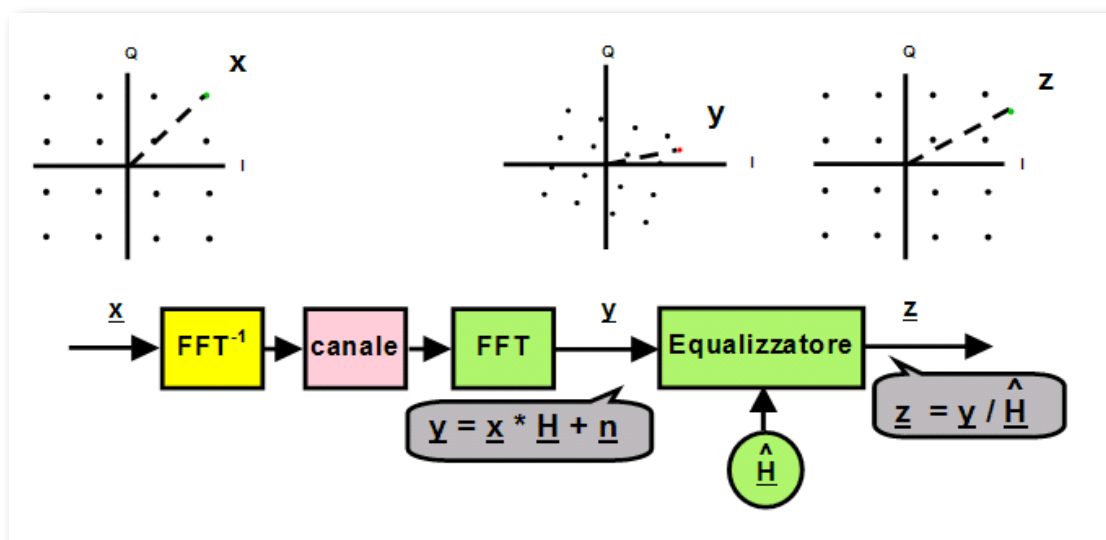
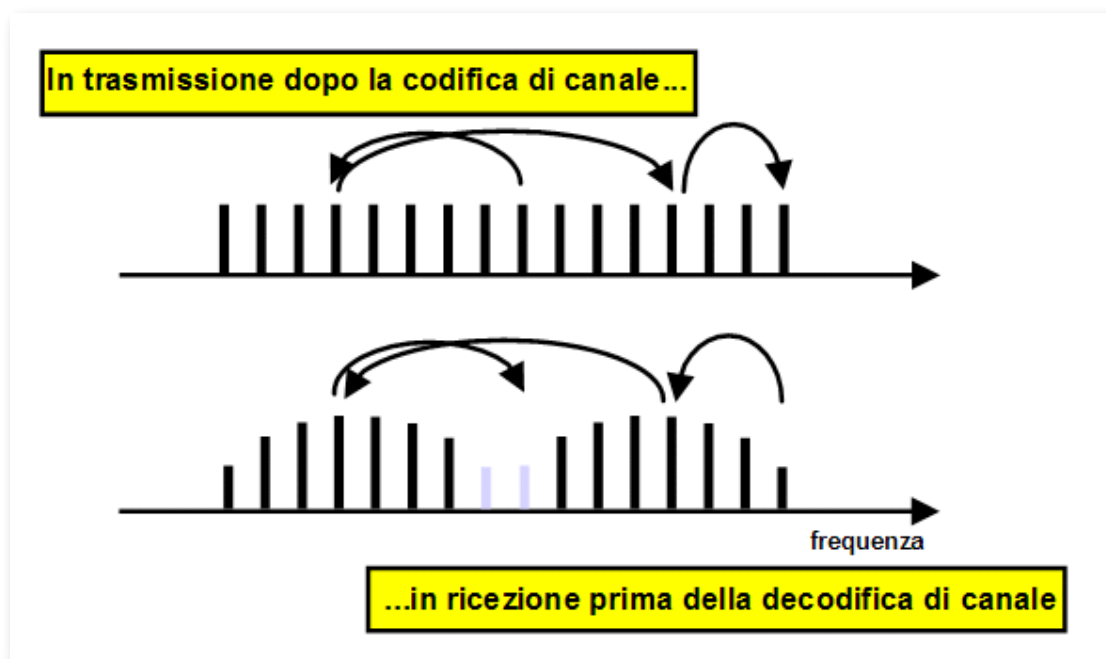
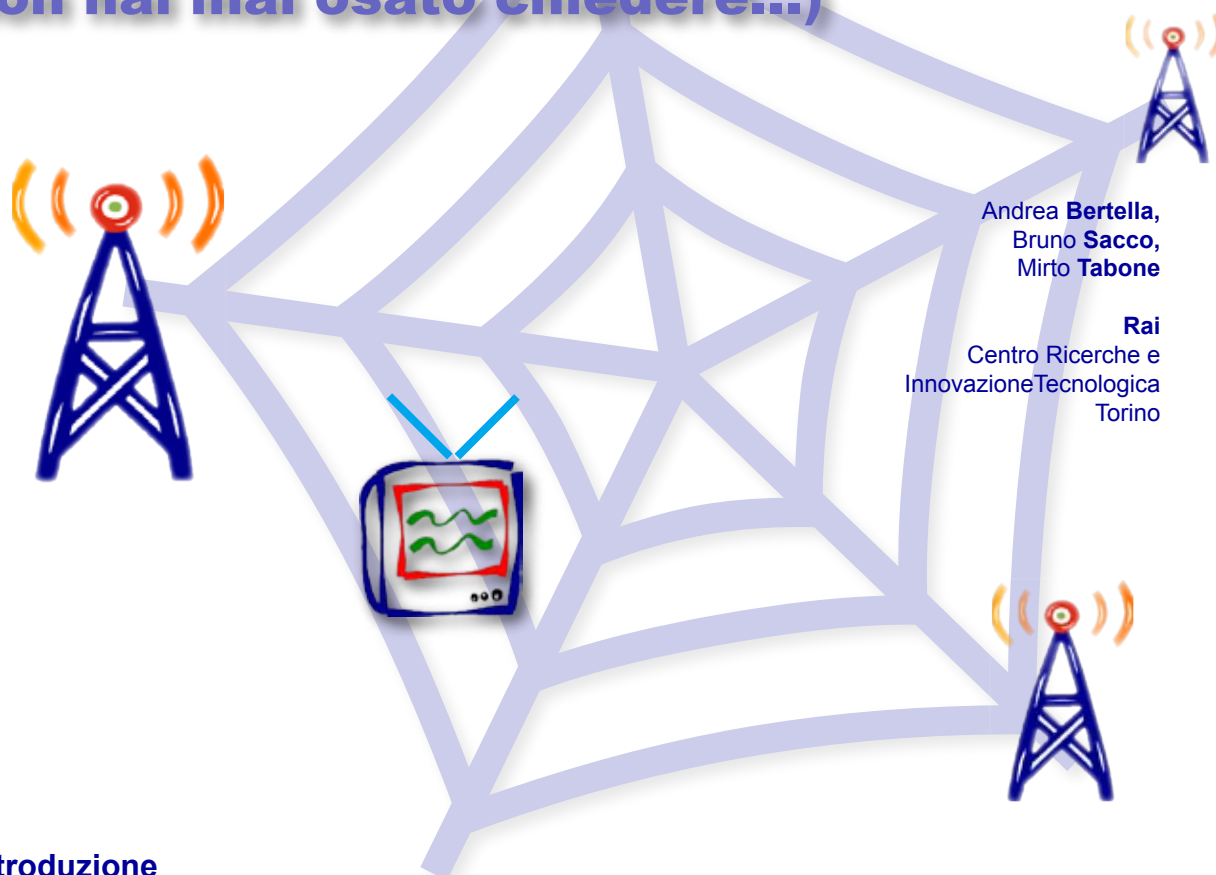
Fig. 7 - Equalizzazione del segnale OFDM.

cambia l'ordine della sequenza di dati in trasmissione; il ricevitore poi prima della decodifica di canale attua l'operazione inversa, allontanando fra loro dati associati a portanti vicine attenuate dal *fading*. Tutto ciò per di sfruttare al meglio le potenzialità del decodificatore. L'interallacciatore può essere di frequenza, se opera sui dati trasportati da un singolo simbolo OFDM, ed è quindi atto a contrastare l'effetto del solo fading selettivo in frequenza, tipico dei canali statici o tempo invarianti, oppure di tempo, se opera sui dati trasportati da più simboli OFDM, ed è quindi atto a contrastare anche l'effetto del fading tempo variante, tipico del canale mobile.

Fig. 8 - Effetto dInterlacciamento in frequenza delle portanti dati di in sistema COFDM.

Reti SFN DVB-T: Q&A

(tutto quello che avresti voluto sapere sui trasmettitori SFN e non hai mai osato chiedere...)

Andrea **Bertella,**
Bruno **Sacco,**
Mirto **Tabone**

Rai
Centro Ricerche e
InnovazioneTecnologica
Torino

1. Introduzione

Per coprire efficacemente un vasto territorio non è sufficiente di solito un solo trasmettitore. Ma un ricevitore può "non gradire" l'arrivo contemporaneo dei segnali trasmessi da due (o più) trasmettitori. In generale per un ricevitore il segnale "utile" è il più robusto; gli altri sono interferenti. Una soluzione è pianificare frequenze diverse per trasmettitori limitrofi.

In tecnica digitale, grazie all'OFDM, è possibile, in certa misura, rendere "costruttiva" l'interferenza e permettere l'allestimento di reti di trasmettitori isofrequenziali. Con ovvi vantaggi e qualche svantaggio.

Sommario
Nelle pagine che seguono abbiamo raccolto alcune "domande frequenti" che si pongono nel progettare, mantenere, controllare una rete SFN DVB-T (i medesimi concetti si applicano comunque anche ad altre reti SFN). Abbiamo aggiunto qualche domanda "di base" e abbiamo quindi cercato di dare delle risposte che siano semplici e chiare, ma fondate su solide basi di anni di esperienza "hands-on", come dicono gli inglesi. Il linguaggio è stato mantenuto volutamente informale, per permettere una lettura facile e.. simpatica.

2. “Che cosa è una rete SFN?”

Il tipo più semplice, e più familiare, di rete diffusiva DVB-T è quello in cui i ciascun trasmettitore opera su una frequenza diversa da quelli limitrofi. Si parla dunque di rete **MFN**.

Difetto: bassa efficienza sull’utilizzo delle frequenze in sede di pianificazione.

Pregio: gestione semplice della rete.

Con la modulazione OFDM[Nota 1] si è aperta una nuova possibilità: dato che il ricevitore tollera echi il cui ritardo è inferiore ad un parametro di modulazione[Nota 2], T_g, è possibile ricevere due o più segnali identici trasmessi da altrettanti trasmettitori, a patto che le distanze in gioco siano tali da rispettare il vincolo di cui sopra sui ritardi.

In altre parole, le seguenti due situazioni:

- un solo trasmettitore, ambiente propagativo ricco di echi;
- un insieme di trasmettitori[Nota 3],

sono virtualmente la stessa cosa, e il ricevitore è in grado, entro il vincolo citato e a prezzo di un certo degradamento del margine di C/N, di ricevere correttamente.

Si profila quindi una nuova applicazione, che per i sistemi di trasmissione radio e TV convenzionali non era ipotizzabile: far operare tutti i trasmettitori di una rete sulla medesima frequenza. Si parla quindi di rete **SFN**.

Nota 1 - Utilizzata nei sistemi broadcasting DAB, DVB-T, DRM e in prospettiva nel DVB-T2

Nota 2 - T_g (anche indicato con τ_g) è la durata dell’intervallo di guardia del simbolo della modulazione OFDM

Nota 3 - Oltre ad eventuali echi “naturali”

Acronimi e sigle

DAB	*Digital Audio Broadcasting (www.worlddab.org)*
DRM	*Digital Radio Mondiale - (www.drm.org)*
DVB	*Digital Video Broadcasting (www.dvb.org)*
-T	*-Terrestrial*
-T2	*-New Terrestrial*
GPS	*Global Positioning System (www.gps.gov)*
MIP	*Megaframe Initialization Packet*
MFN	*Multi Frequency Network*
MPEG	*Motion Picture Expert Group (www.chiariglione.org/mpeg)*
-TS	*-Transport Stream*
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
PCR	*Program Clock Reference*
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation*
RF	*Radio Frequency*
SFN	*Single Frequency Network*
STS	*Synchronisation_time_stamp*

3. “Se porto sulla stessa frequenza tutti i trasmettitori DVB-T della mia rete MFN esistente, ottengo una rete SFN?”

No.

Come accennato sopra, i **segnali** trasmessi devono essere **identici**.

Identici significa:

A. stessa frequenza RF.

B. stessi bit mappati dai modulatori nello stesso simbolo OFDM;

C. stesso simbolo OFDM trasmesso contemporaneamente;

Mentre la condizione A è abbastanza semplice da ottenere, le condizioni B e C no. Con i trasmettitori DVB-T "MFN" c'è una difficoltà: anche se distribuisco il medesimo transport stream ai trasmettitori, all'ingresso di ciascuno di essi è presente un blocco, il Rate Adapter, che bufferizza il flusso e aggiunge null packets per arrivare al bit rate richiesto dalla modulazione. Questo processo non è deterministico: un trasmettitore può inserire un null packet in un certo istante, un altro trasmettitore potrebbe farlo in un altro istante, seguendo criteri statistici. Il risultato è che i bit mappati sul simbolo OFDM corrente sono diversi per ciascun trasmettitore.

4. "Che cosa ha dunque di particolare un trasmettitore SFN?"

Per il problema appena citato si è dovuto "specializzare" il trasmettitore, o meglio tutta la rete, all'utilizzo in SFN. Vediamo come.

La "pietra dello scandalo", dunque è il Rate Adapter, cioè quel blocco che riceve il flusso ad un valore[Nota 4] di bit rate che gli è stato assegnato in sede di generazione (head end), arbitrario, approssimativo, e comunque inferiore a quello da trasmettere sul canale, e lo porta ad un valore ben preciso, determinato dalla capacità trasmissiva della modulazione scelta (e quindi in definitiva dai parametri di modulazione).

In una rete SFN, per quanto detto al punto precedente, non ci possono essere tanti Rate Adapters, ce ne deve essere uno solo. Quindi la scelta è stata di trasferire questa funzione a monte della distribuzione del segnale ai trasmettitori: in pratica nel "centro caporete".

L'apparato che ne è nato si chiama "SFN adapter" ed esplica anche altre funzioni (vedere oltre).

Nota 4 - Al netto di null packets eventualmente già presenti in generazione

5. "Ma la rete di distribuzione riesce a garantire «stessi bit nello stesso istante» ?"

La rete in sé, no. Supponiamo che un pacchetto MPEG-TS parta dal centro di generazione, ad esempio da Roma, all'istante zero: esso arriverà al Tx1 dopo -diciamo- 80 ms e al Tx2 dopo -diciamo- 100 ms. Quindi ci sarebbe un disallineamento di 20 ms.

6. "Come funziona l'allineamento dei flussi"?"

Riferiamoci all'esempio precedente. Si impiega la seguente tecnica: all'ingresso del Tx1 si inserisce un ritardo di 20 ms, e all'ingresso del Tx2 si inserisce un ritardo di 0 ms. In questo modo i bit trasmessi sono allineati tra loro (a prezzo di un ritardo di 100 ms comune a tutti).

Ovviamente nella pratica i trasmettitori possono essere molti; ciascuno dovrà inserire un ritardo pari a quanto manca per allineare se stesso al trasmettitore "più lontano".

Questo meccanismo viene automatizzato tramite un sistema di sincronizzazione piuttosto complesso.

Il primo passo concettuale è quello di disporre un **riferimento di tempo comune** tra ingresso della rete di distribuzione (sito caporete) e uscite della rete stessa (siti Tx). Si è adottato il riferimento di tempo del GPS (segnale 1 pps, un impulso al secondo e clock campione, 10 MHz). La prima implicazione è che ogni sito Tx, e il sito caporete, dovranno essere dotati di ricevitore GPS con le uscite di tempo campione.

Secondo passo concettuale: bisogna inserire all'ingresso della rete un "**marchio temporale**", un "bollino" che possa essere riconosciuto ad ogni uscita della rete (sito Tx) osservando i dati che fluiscono. Il marchio temporale scelto è l'istante di inizio di una (sovra)struttura di trama, detta *Megaframe*. Un Megaframe contiene un numero intero, fisso, predefinito di pacchetti MPEG.

L'inizio del Megaframe potrebbe essere comodamente individuato da un pacchetto specifico di servizio da inserirsi a tale scopo a cura dell'SFN adapter. Tuttavia, visto che l'inserimento di un pacchetto in un transport stream già esistente richiede lo spostamento di altri pacchetti (e se questi sono Audio/Video è necessario l'aggiornamento dei time-stamps PCR), si è scelta una strada diversa: l'istante (pacchetto) di inizio del Megaframe viene individuato indicando dopo quanti pacchetti a partire da un certo evento viene a trovarsi tale pacchetto. L'evento è l'emissione del pacchetto MIP da parte del SFN adapter.

Riassumendo: l'SFN adapter inserisce[Nota 5] periodicamente[Nota 6] un pacchetto MIP all'interno del flusso. In un campo dedicato del MIP, di nome *Pointer*, viene indicata la distanza in pacchetti che separa il MIP stesso dal prossimo inizio del Megaframe. In questo modo un trasmettitore SFN può operare il procedimento inverso: estrarre il campo Pointer e utilizzarne il valore per contare i pacchetti che seguono fino ad arrivare ad individuare l'inizio della Megaframe.

Nota 5 - Tramite intarsio di un Null Packet

Nota 6 - In realtà l'emissione non è periodica, a causa della granularità costituita dalla struttura a pacchetti del Transport Stream MPEG

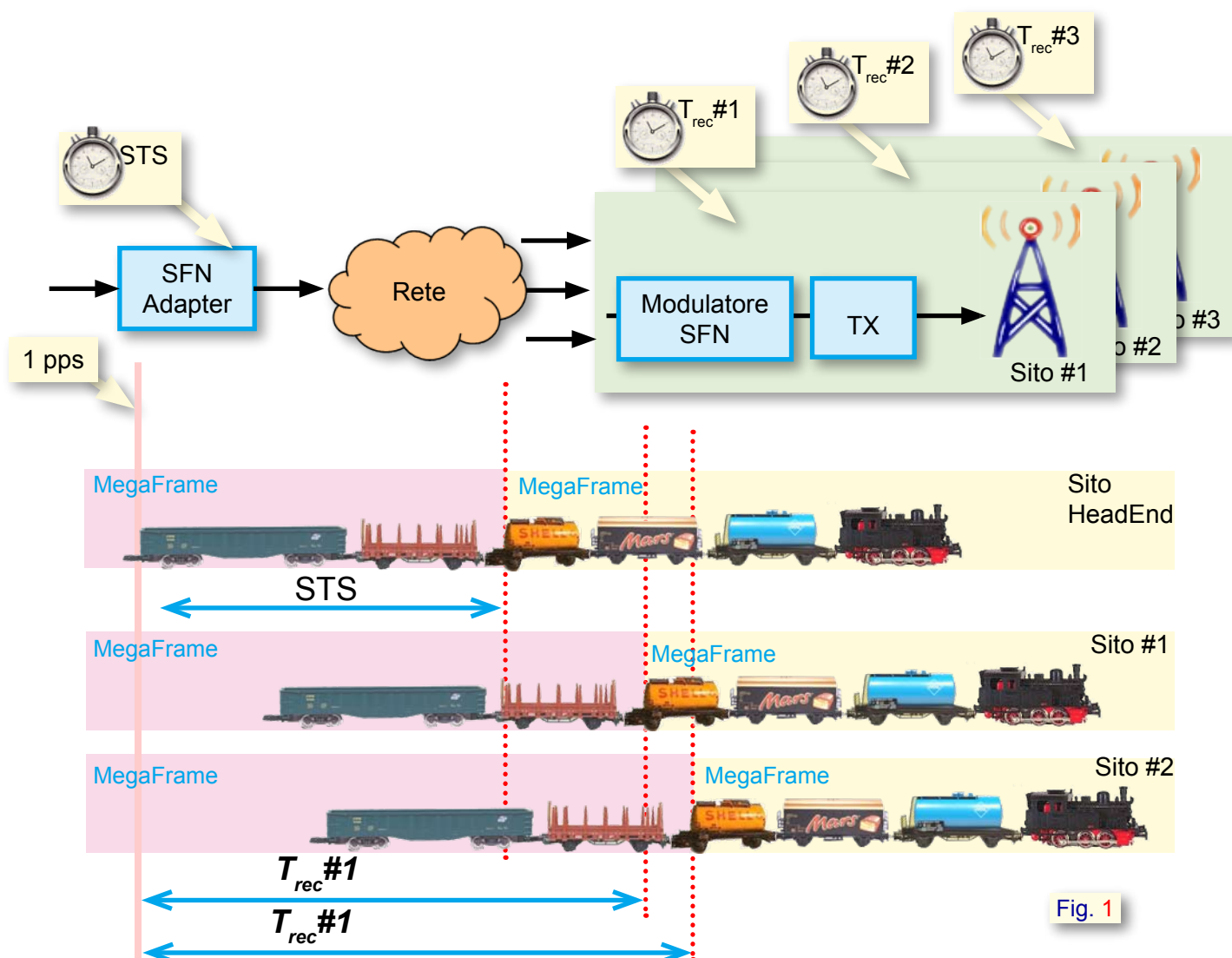



Fig. 1

Nel MIP sono stati definiti anche i seguenti campi (più altri che qui non ci interesseranno):

- **Synchronisation_time_stamp, STS**: Contiene l'intervallo di tempo, espresso in colpi di clock da 10 MHz, tra l'ultimo impulso del segnale 1 pps che precede l'inizio del Megaframe M+1 e -appunto- l'inizio (1° bit del 1° pacchetto) del MegaFrame M+1. Questo valore è una variabile ottenuta dalla lettura di un cronometro (contatore binario cloccato a 10 MHz) contenuto all'interno dell'SFN adapter.
- **Maximum_delay**: Contiene l'intervallo di tempo, espresso in colpi di clock da 10 MHz, che si intende realizzare tra l'SFN Adapter e l'antenna trasmittente. Il range ammissibile è 0..9999999 colpi di clock corrispondente a 0..1 sec. Questo valore è una costante, che viene decisa dal progettista della rete SFN e non viene poi cambiata.

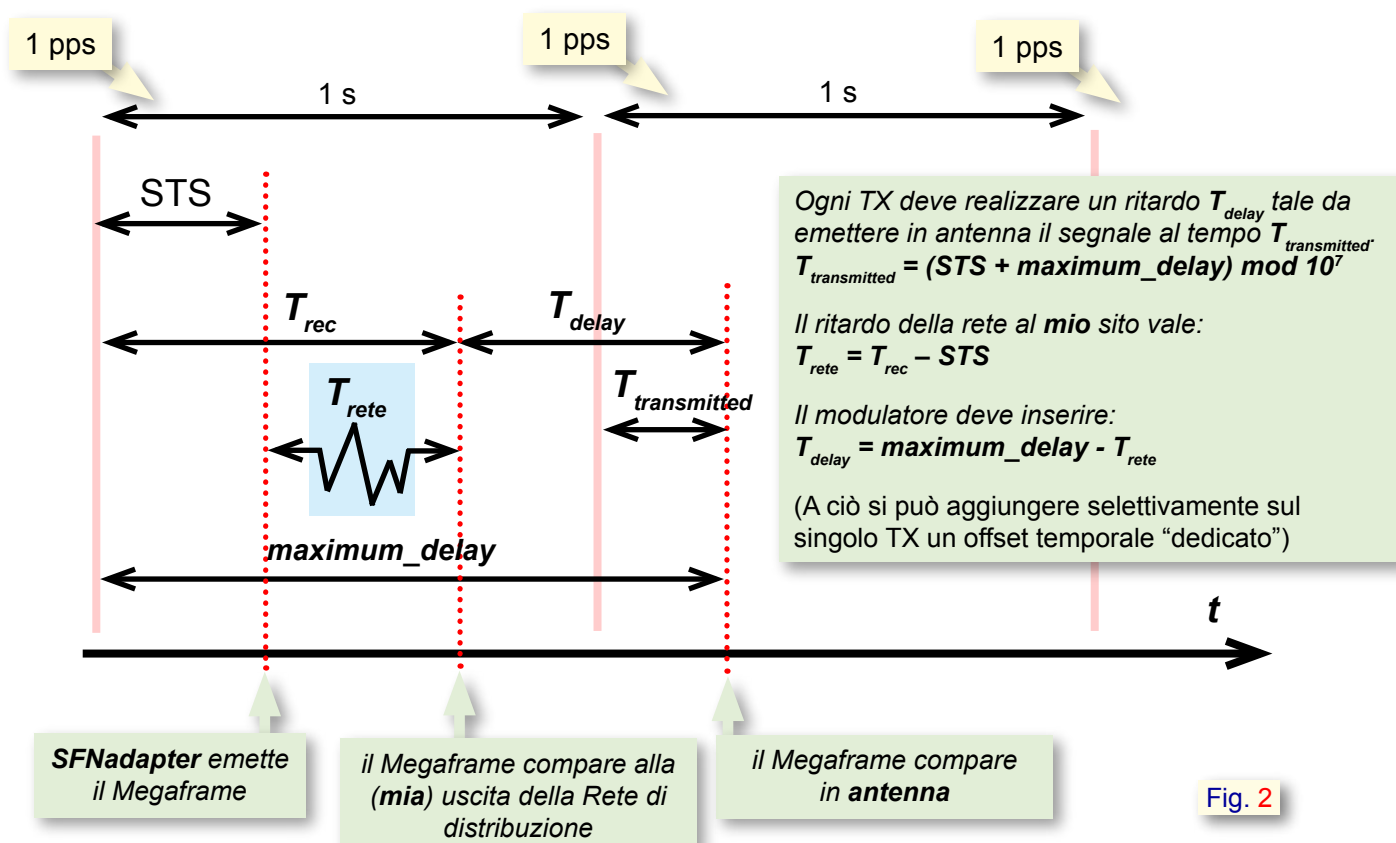
Infine, bisogna stabilire una **procedura di allineamento**.

Vediamo come funziona il sistema di allineamento SFN del DVB-T.

Come accennato, nell'SFN adapter è presente un cronometro (contatore bloccato a 10 MHz) che definisce la distanza temporale STS tra l'impulso 1 pps e il successivo inizio del Megaframe (figura 1).

Un cronometro del tutto analogo viene previsto all'interno di ciascun modulatore SFN. Anche questo cronometro misura la distanza temporale ("T_{rec}") tra l'impulso 1 pps e il successivo inizio del Megaframe. Ma mentre l'impulso 1 pps, fornito da ciascun ricevitore GPS è allineato con gli omologhi 1 pps, l'inizio del Megaframe "visto" all'arrivo al modulatore risulterà ritardato rispetto a quello in partenza dall'SFN adapter. Il ritardo è quello di propagazione attraverso la rete di distribuzione, ed è ovviamente differente da sito a sito.

Il ritardo Trete viene calcolato dunque (figura 2) come $T_{rete} = T_{rec} - STS$.

Fig. 2

Ricordiamo che STS è accessibile dal modulatore leggendo il relativo campo del MIP in arrivo.

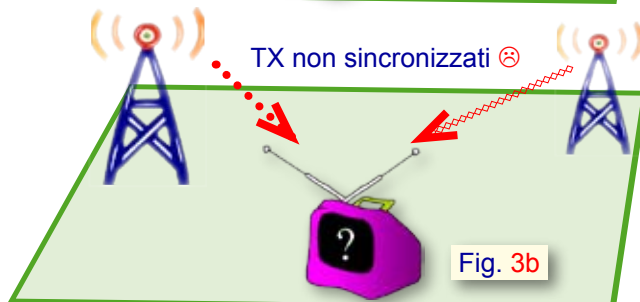
Il modulatore dovrà quindi programmare il suo buffer di memoria per realizzare un ritardo T_{delay} = maximum_delay – T_{rete} .

7. “Come funziona l’allineamento in frequenza?”

Non è un concetto particolarmente nuovo.

I trasmettitori vengono agganciati sulla medesima frequenza tramite i seguenti passi:

1. Il modulatore produce un segnale alla frequenza nominale tramite un oscillatore sintetizzato **agganciato** al riferimento 10 MHz del ricevitore GPS. Quindi tutti i modulatori generano segnali alla medesima frequenza.
2. Gli (eventuali[Nota 7]) oscillatori locali usati per gli (eventuali) convertitori di frequenza per portare il segnale al canale RF desiderato **devono** essere a loro volta agganciati al 10 MHz del GPS.

Come si comprende, i segnali trasmessi risulteranno alla stessa frequenza, agganciati al medesimo 10 MHz.

8. “Che cosa succede se i miei trasmettitori SFN non sono correttamente agganciati?”

Riferiamoci, per semplicità, al caso di due soli trasmettitori in rete SFN. In sintesi, possono verificarsi i due casi seguenti:

1. **CASO 1 (figura 3a)**. I due TX , in modalità SFN, sono **sincronizzati correttamente**. Un ricevitore che riceva entrambi i segnali contemporaneamente funzionerà correttamente (a patto di avere un C/N sufficiente, vedi oltre). In questo caso la disponibilità della ricezione è condizionata dall’avere un C/N superiore a quello richiesto per la modulazione in uso, più un extra di qualche dB, dovuto al multipath “artificiale”. Ad esempio: 5÷6 dB in 64QAM 2/3.
2. **CASO 2 (figura 3b)**. I due TX , in modalità SFN, **non sono sincronizzati correttamente**. Un ricevitore che riceva entrambi i segnali contemporaneamente si troverà in una condizione in cui riceve un segnale utile (il più robusto) interferito –cocanale!- dal secondo. In questa situazione la disponibilità della ricezione è condizionata dall’avere un C/N superiore a quello richiesto per la modulazione in uso, ma il segnale interferente qui gioca in ruolo di N, insieme al rumore termico. In altre parole $C/N_{TOT}=C_1/(N+C_2)$.

   2.1 Esempio 1: se TX1 e TX2 sono ricevuti a pari livello (quindi $C_1 = C_2$) allora $C/N_{TOT} = C_1/(N+C_2)$ è minore di uno, quindi, in dB, C/N è negativo ⇨☹☹

   2.2 Esempio 2: se C_1 sovrasta C_2 di 10 dB (ad es. perché TX1 è più vicino) e N è trascurabile (cioè segnale robusto), allora $C/N=C_1/(N+C_2)$ è circa 10 dB. Ma un valore di C/N di 10 dB è pessimo ad esempio nel caso 64QAM 2/3 ⇨☹☹.

Nota 7 - Spesso il modulatore è integrato nel trasmettitore e opera direttamente alla frequenza del canale RF

Che cosa è successo? Siamo passati da un C/N ottimo (dicevamo: N trascurabile, segnale robusto) ad un C/N pessimo (C_2 gioca il ruolo del rumore) a causa della presenza di un TX (TX2) non sincronizzato ricevuto 10 dB sotto il principale. [esempio nell'esempio: 64QAM 2/3, C_1/N = 40 dB; C_2/N = 30 dB; entrambi i TX, ciascuno da solo, sarebbe ricevuto ottimamente. Notiamo che C_1/C_2 = 10 dB, cioè TX1 arriva 10 dB più forte di TX2. In queste condizioni però TX2 è in pratica un interferente cocanale 10 dB sotto, equivalente a un C/N_{TOT} = 10 dB (il rumore termico N è qui trascurabile rispetto a C_2), disastroso per il 64 QAM 2/3.]

9. "Come posso verificare se i miei trasmettitori SFN sono correttamente agganciati?"

Questo è un argomento piuttosto delicato, e decisamente cruciale.

Introduciamo il concetto di **Coerenza**. Sotto questa voce troviamo, su Wikipedia:

*"In ottica si chiama **coerenza** (o coerenza di fase) la proprietà di un'onda elettromagnetica di mantenere una certa relazione di fase con sé stessa durante la sua propagazione. Questo concetto è stato generalizzato a tutti i fenomeni ondulatori dall'acustica alla meccanica quantistica.*

*Il fenomeno macroscopico più noto dovuto alla coerenza di fase è quello dell'**interferenza**. Infatti mentre fasci di luce coerenti (come quelli prodotti da un laser) possono produrre delle **frange di interferenza**, osservare fenomeni di interferenza con la luce prodotta da una lampada ad incandescenza, anche se resa monocromatica con un opportuno filtro, risulta estremamente difficile (…)."*

Applichiamo quanto sopra alla nostra rete SFN, con i seguenti distinguo:

- Invece che con *sé stessa*, la relazione di fase è definita con l'onda che nasce, identica, da un altro TX sincrono.
- L'"*interferenza*" di cui si parla, con il significato della meccanica ondulatoria, non è quella a cui siamo abituati a pensare noi: si tratta piuttosto di sovrapposizione di onde che dà come risultato "*frange di interferenza*", ovvero successione di massimi e minimi nel livello del segnale ricevuto, al variare un certo parametro. Ad esempio: un antennista conosce bene tale fenomeno, quando, in presenza del raggio diretto e del raggio riflesso dal suolo, opera la "stratificazione": alza o abbassa il palo con l'antenna e trova una successione di massimi e minimi del livello del segnale ricevuto.
- "*frange di interferenza*": cosa sono è stato detto al punto precedente; qui noi adotteremo un parametro di variazione ancora diverso: la frequenza. Frequenza per frequenza possiamo osservare a valle dell'antenna ricevente una successione di massimi e minimi nel livello del segnale ricevuto dovute alla sovrapposizione delle onde provenienti dai diversi TX. A certe frequenze risultano in fase e si sommano (massimi) ad altre in controfase e si sottraggono (minimi).

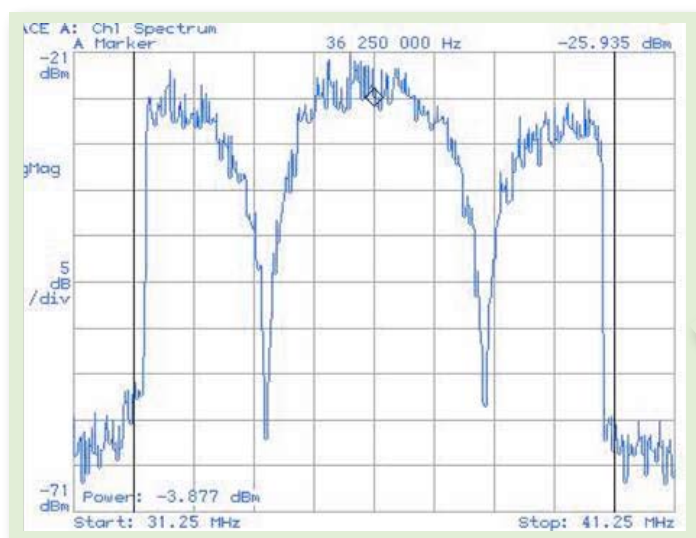



Fig. 4

Il **metodo di verifica** della sincronicità (o meglio: Coerenza) di due TX SFN che **utilizziamo al Centro Ricerche Rai** è basato appunto sul fenomeno dell'interferenza (in senso ondulatorio!), rilevata nel dominio della frequenza. All'interno della banda del canale si può rilevare con un analizzatore di spettro (figura 4) una serie di massimi e minimi (interferenza "in senso ondulatorio", appunto) nel livello del segnale[Nota 8].

L'ondulazione che ne risulta obbedisce alle seguenti proprietà:

1. La **profondità dei minimi** ("buchi" o, come dicono gli inglesi, "notches") è tanto maggiore quanto più i livelli dei due segnali che partecipano all'interferenza sono simili. Alcuni valori di riferimento esemplificativi in tabella:

Differenza livello segnali TX [dB]	Ondulazione		
	Massimi [dB]	Minimi [dB]	Totale, picco-picco [dB]
0	+6	- ∞	∞
1	+5.5	-19.3	24.8
3	+4.6	-10.7	15.3
10	+2.4	-3.3	5.7
20	+0.8	-0.9	1.7

   E' facile notare che per poter vedere agevolmente i buchi sull'analizzatore di spettro i due segnali devono avere livello simile (possibilmente entro 3 dB).

2. La **distanza dei buchi** (periodicità[Nota 9] in frequenza) Δf è pari all'inverso del ritardo temporale τ tra i due segnali (o ritardo differenziale): $\Delta f = 1/\tau$. Quindi: maggiore il ritardo, più fitti sono i buchi, e viceversa.

3. La **posizione del pettine di buchi** dipende dalla differenza di fase delle portanti dei due segnali.

Le conseguenze delle proprietà di cui sopra sono:

- per poter vedere agevolmente i buchi sull'analizzatore di spettro i due segnali **devono avere livello simile** (possibilmente entro 3 dB).
- Il ritardo differenziale τ **non deve essere inferiore** all'inverso della banda B del segnale: $\tau > 1/B$. In caso contrario potrebbe essere visibile meno di un buco.
- Il ritardo differenziale $\Delta\tau$ deve essere inferiore all'inverso della risoluzione dell'analizzatore di spettro ($\tau < 1/R_{BW}$), in caso contrario non si riusciranno a visualizzare i buchi, troppo fitti.
- Se i due TX non sono perfettamente agganciati in frequenza, la fase differenziale aumenta col tempo, e di conseguenza la posizione del pettine di buchi. In altre parole i buchi scorrono. Se lo scorrimento è troppo veloce, possiamo avere problemi di visualizzazione sull'analizzatore di spettro[Nota 10].

Nelle condizioni prescritte, se i due segnali sono coerenti si visualizzeranno i buchi (o "frange di interferenza" per dirla come i fisici); se i due segnali non sono coerenti lo spettro risultante sarà come la sovrapposizione dei due spettri originali, in ossequio a ciò che leggiamo nella seconda parte della citazione di Wikipedia: *"…mentre fasci di luce coerenti (come quelli prodotti da un laser) possono produrre delle frange di interferenza, osservare fenomeni di interferenza con la luce prodotta da una lampada ad incandescenza, anche se resa monocromatica con un opportuno filtro, risulta estremamente difficile"*

Il set-up di laboratorio per verificare su banco problemi di sincronizzazione è schematizzato in figura 5.

Nota 8 - In appendice riportiamo una descrizione del fenomeno un po' più approfondita.

Nota 9 - Nel caso di due soli segnali la sequenza di massimi e minimi è periodica in frequenza

Nota 10 - Consideriamo comunque che se l'errore di frequenza è poco più che trascurabile i TX possono essere considerati non sincronizzati.

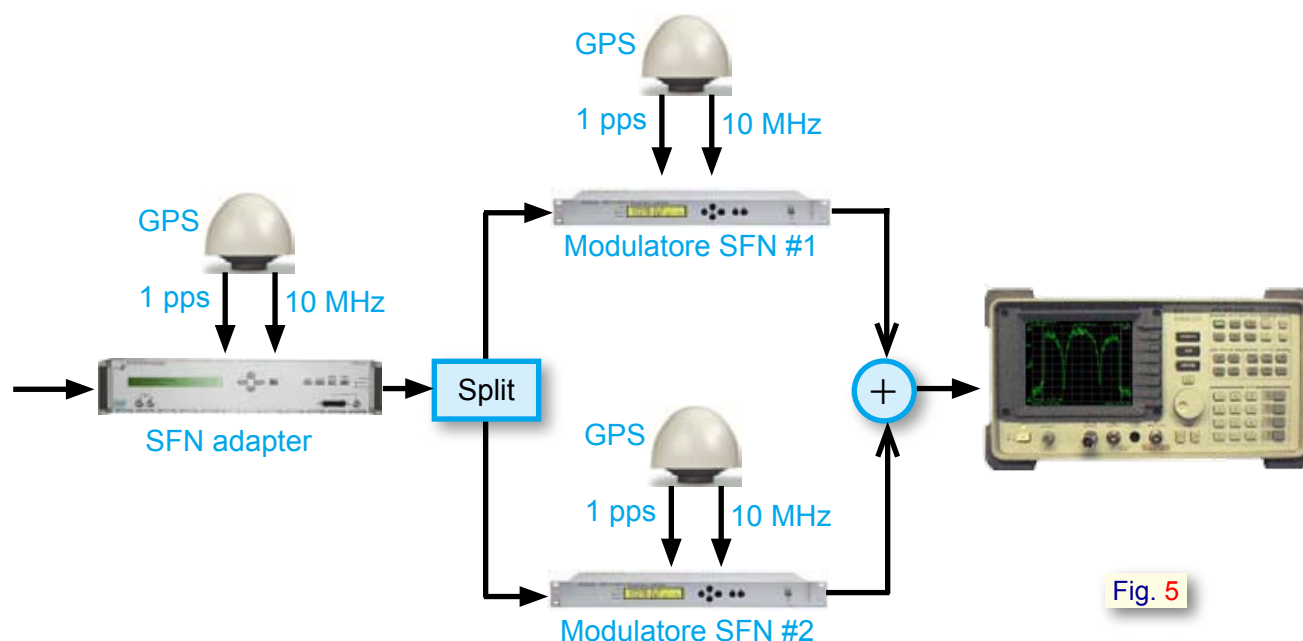



Fig. 5

Il transport stream (TS) viene inviato ad un SFN adapter che provvede ad adattare il rate al valore appropriato per la modulazione[Nota 11] scelta, a definire il Megaframe e inserire il MIP. Il TS in uscita viene distribuito ai due modulatori SFN. A questo livello è possibile inserire apparati di distribuzione (network adapters, ecc.) da testare.

L'uscita dei modulatori è combinata in RF e il segnale ottenuto è visualizzato con un analizzatore di spettro.

Se il ritardo differenziale è nullo o molto piccolo non è soddisfatto il citato criterio $\tau > 1/B$, quindi per poter visualizzare i buchi occorre introdurre un ritardo artificiale (poche centinaia di ns) agendo sulla configurazione di uno (solo) dei due modulatori.

10. "Veniamo alla diagnosi, quindi: come devo interpretare le frange di interferenza che vedo sull'analizzatore di spettro?"

Per quanto detto sopra, avremo due situazioni macroscopiche:

a) Le frange di interferenza (buchi) non ci sono, nel qual caso i due TX non sono coerenti (in altre parole non sono sincronizzati), oppure

b) ci sono, e i due TX sono coerenti (quindi sincronizzati).

Vediamo alcuni casi significativi.

In figura 6a è riportato lo spettro "di riferimento": è quello relativo ad un solo TX[Nota 12].

Nella situazione a), dovremmo rilevare uno spettro del tutto analogo a questo, l'unica differenza dovrebbe essere un livello pari alla "somma" (in unità lineari !!) dei livelli. Quindi se il livello del solo TX1 è, ad es., -30 dBm ed il livello del solo TX2 è, ad es., identicamente -30 dBm, allora la somma risulta essere -27 dBm[Nota 13].

Nota 11 - Costellazione, code rate, intervallo di guardia, FFT size.

Nota 12 - Lo spettro è particolarmente pulito, grazie al fatto che non ci sono echi né interferenti analogici co-canali.

Nota 13 - -30 dBm = 1 μW; 1 μW + 1 μW = 2 μW ; 2 μW = -27 dBm

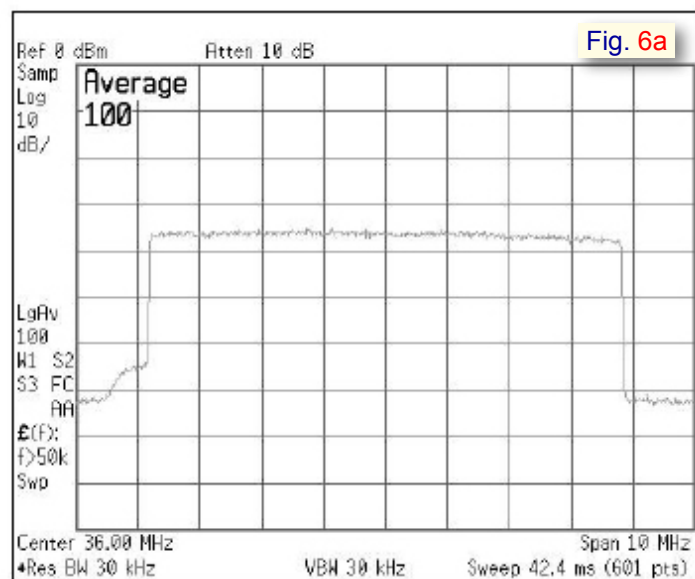



Fig. 6a

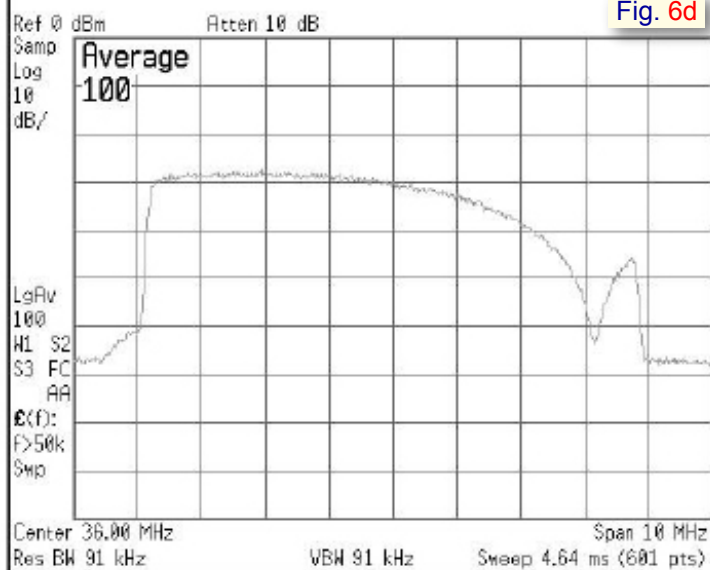



Fig. 6b

Fig. 6c

Fig. 6d

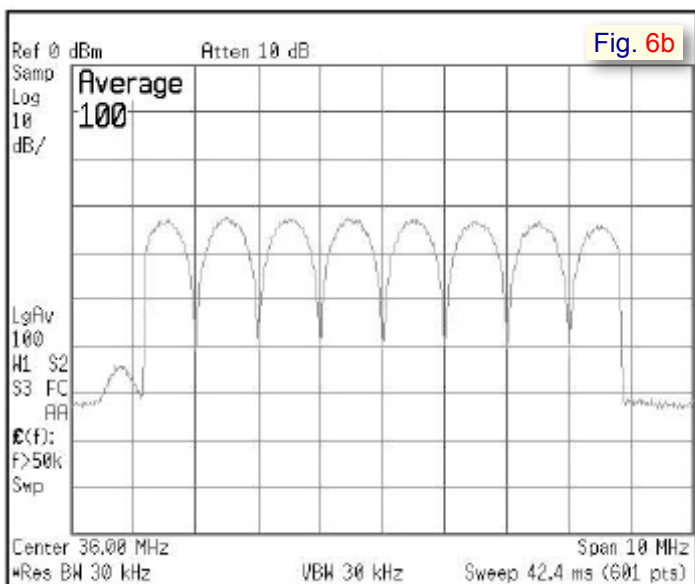
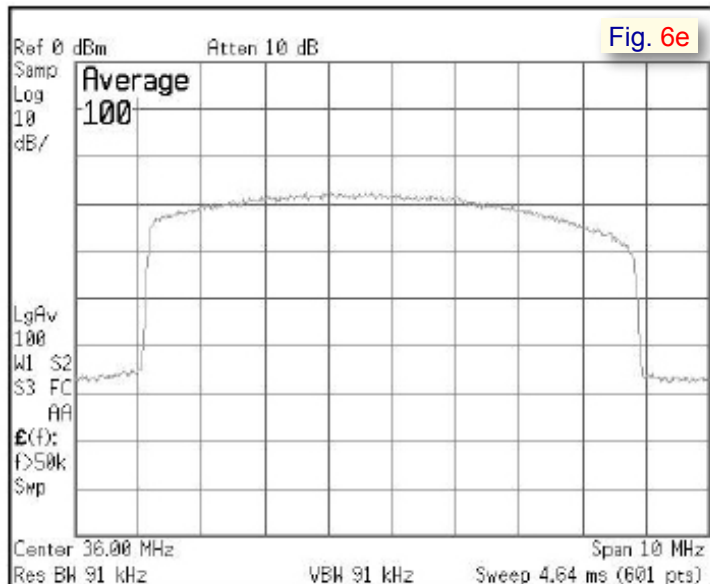



Fig. 6e

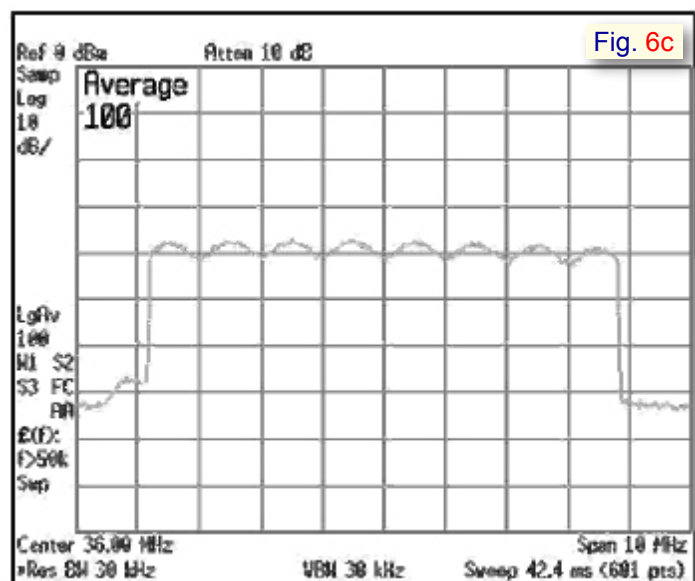
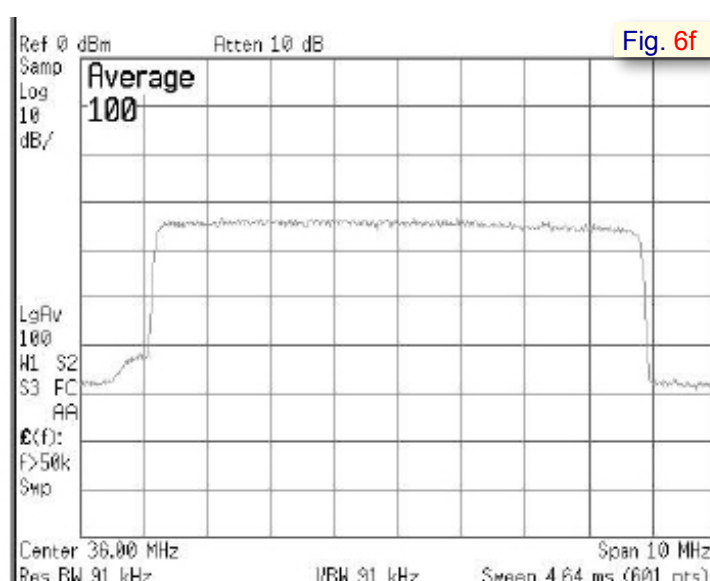



Fig. 6f

Analizziamo ora la figura 6b.

La presenza di buchi denota che il segnale è il risultato della somma di due segnali DVB-T coerenti. Inoltre lo spettro ci fornisce altre indicazioni interessanti: la distanza tra i buchi è 1 MHz, da cui otteniamo che il ritardo differenziale è di 1/(1 MHz) = 1 μs. La profondità dei buchi è molto grande (in realtà la risoluzione dell'analizzatore di spettro ne limita la visibilità): 25 dB o più. Si deduce, consultando la tabella più sopra, che i segnali sono a pari livello, o hanno differenza entro 1 dB.

La figura 6c è relativa ad un caso analogo; l'unica differenza è il livello differenziale dei segnali che risulta 15 dB circa (cfr. tabella, con ondulazione totale = 3 dB circa). Se i due segnali non hanno livelli simili, i buchi –come già detto- sono poco profondi: qui si vede nella prova dei fatti che possono essere di difficile rilevazione.

Le figure 6d e 6e che seguono sono "parenti stretti".

Nella prima si evidenzia un solo buco. Gli altri buchi cadono quindi al di fuori della banda del canale, dove il segnale è già nullo. Esiste una periodicità, che ad una stima che richiede una certa dose di immaginazione, potrebbe risultare di circa 20 MHz (e quindi ritardo differenziale di circa 1/(20 MHz) = 50 ns. Buco molto profondo, quindi livelli dei segnali molto simili. La coerenza dei trasmettitori, quindi, c'è.

La seconda figura è relativa alla stessa situazione, in cui però i buchi cadono tutti fuori banda. Questo è dovuto ad una fase differenziale diversa dalla precedente, ma che nella pratica potrebbe avere luogo spostando l'antenna ricevente di pochi centimetri. E'chiaro che da questo spettro si è portati a concludere che i due trasmettitori non siano coerenti. Lo stondamento dello spettro, o un'inclinazione ("tilt") del medesimo, deve sempre suggerire una situazione di ritardo differenziale corto e fase differenziale tale da portare il buco fuori banda.

Infine, la figura 6f è stata prodotta non rispettando il vincolo che prescrive che il ritardo differenziale dei segnali debba essere inferiore all'inverso della risoluzione dell'analizzatore di spettro($\tau < 1/R_{BW}$).

Come si può notare, non si riescono a visualizzare i buchi, che sono troppo fitti.

In questo caso τ valeva 100 μs, quindi la distanza tra i buchi risultava 1/(100 μs) = 10 kHz. La resolution bandwidth dell'analizzatore di spettro era (cfr. figura, parametro in basso a sinistra) R_{BW} = 91 kHz.

11. "E se invece di due TX ricevessi tre o più TX?"

Con più di due segnali coerenti la conformazione dello spettro non è più semplicemente un pettine di buchi. Lo spettro risulta frastagliato, se due dei TX sono preponderanti e di livello simile si avrà ancora una frastagliatura che ricorda il caso di due soli TX (con le regole dette sopra), cui si sovrappone un'ulteriore frastagliatura. La situazione è del tutto simile a quella di echi multipli che è familiare a chi osservi lo spettro ricevuto del segnale OFDM.

Spostando anche di poco l'antenna si modifica considerevolmente la frastagliatura, in prevalenza la componente con ritardi differenziali piccoli.

Dal punto di vista di diagnosi della rete SFN, è opportuno cercare di analizzare i TX a due a due, per semplificare il lavoro

12. "E per le verifiche sul campo, come posso capire se due TX sono correttamente sincronizzati (possibilmente senza interrompere il servizio)?"

Quel che segue è un metodo progettato a partire da quello di laboratorio, adattando il set-up e le modalità operative alle condizioni tipiche delle misure "in-field". Il metodo deve essere verificato e messo a punto.

La figura 7 descrive la configurazione di test proposta.

La posizione del punto di misura deve essere scelta in modo da ottenere una differenza di ritardo compresa tra 100 ns e pochi µs (es: 2 µs). Questo si traduce in una differenza di distanza compresa tra 30 m e 600 m. Giocando sui due attenuatori si deve cercare di rendere i segnali all'ingresso del sommatore il più possibile di pari livello (entro 1-2 dB è sufficiente). Per fare questo è utile visualizzare un segnale alla volta (inserendo sull'altro una forte attenuazione), e annotare i livelli di ciascun segnale. Poi dare attenuazione zero al segnale più debole, e quindi attenuare il più robusto per ottenere (circa) il medesimo livello. A questo punto sull'analizzatore di spettro si dovrebbero vedere i buchi previsti, se i TX sono sincronizzati.

Attenzione: il ritardo differenziale, così importante per poter ottenere un numero di buchi visualizzabile, dipende anche da un eventuale ritardo artificiale inserito su uno o entrambi i TX (parametro time_offset).

Il metodo non richiede la messa in onda di particolari segnali di test, né lo spegnimento di TX, quindi può essere utilizzato senza interrompere il servizio.

13. "Posso usare altri strumenti oltre all'analizzatore di spettro?"

Esistono certamente altri strumenti, più specializzati e più costosi, per analizzare il segnale DVB-T. Tra questi il 4T2 AdCoCom, e l' EFA Rhode & Schwartz.

Prendiamo ad esempio il 4T2. Si può utilizzare proficuamente la visualizzazione della risposta all'impulso (figura 8a).

In presenza di due TX coerenti il 4T2 visualizza il primo impulso (t_1=0) relativo al segnale più robusto. Il secondo (in ordine di livello) segnale verrà visualizzato come un impulso ad una posizione temporale t_2 pari alla distanza in tempo (ritardo differenziale) dal primo segnale. Se tale secondo segnale risulta in ritardo rispetto al primo, la visualizzazione è corretta, e si avrà un secondo impulso a destra del primo. Se il secondo segnale è in anticipo rispetto al primo[Nota 14] la visualizzazione non risulta corretta. Nella

Nota 14 - E'il caso, ad esempio, di un TX1 più vicino ma schermato da case o altri ostacoli, e un TX2 più lontano ma con segnale ricevuto più robusto.

Fig. 7

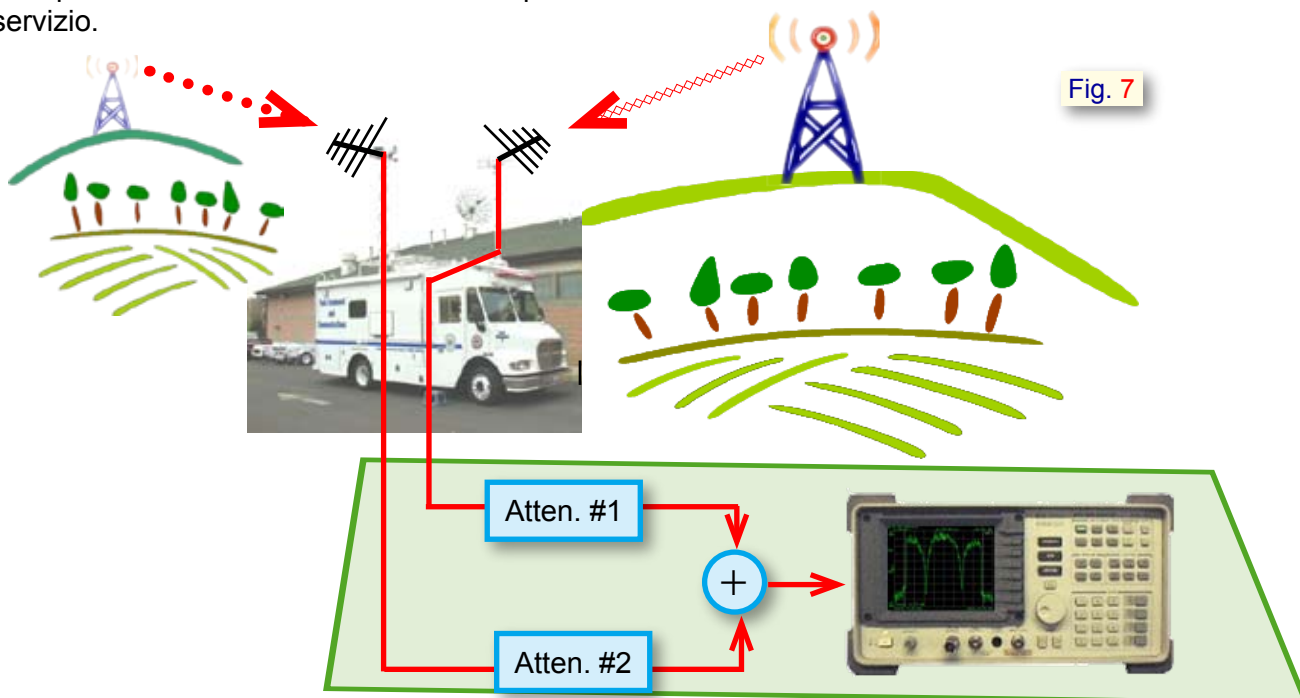



figura 8a vediamo un secondo segnale ritardato 60μs rispetto al primo, 5dB più basso. Nella figura 8b il ritardo è di 1μs. Si noti che segnali con ritardi inferiori cominciano ad essere difficili da visualizzare per la limitata risoluzione dello strumento, dovuta alla limitata banda del segnale[Nota 15].

In caso di tre o più TX coerenti si visualizzeranno un pari numero di impulsi, ai tempi dati dai ritardi differenziali relativi al primo (in ordine di livello) TX.

Se i segnali provenienti dai TX non sono tra loro coerenti, il 4T2 mostra solo un impulso (t_1=0) relativo al segnale più robusto e un rumore di fondo più elevato.

14. "E se un TX differisce per un solo bit?"

Non esistono situazioni pratiche in cui la differenza sia di un solo bit. Ovviamente essendo il flusso che alimenta i modulatori unico, i bit dovrebbero essere uguali per tutti. Diverso è il caso di trasmettitore non correttamente sincronizzato in cui, come già detto, i bit possono venire mappati su sottoportanti OFDM diverse, quindi i bit "diversi" sono molti.

Fig. 8a

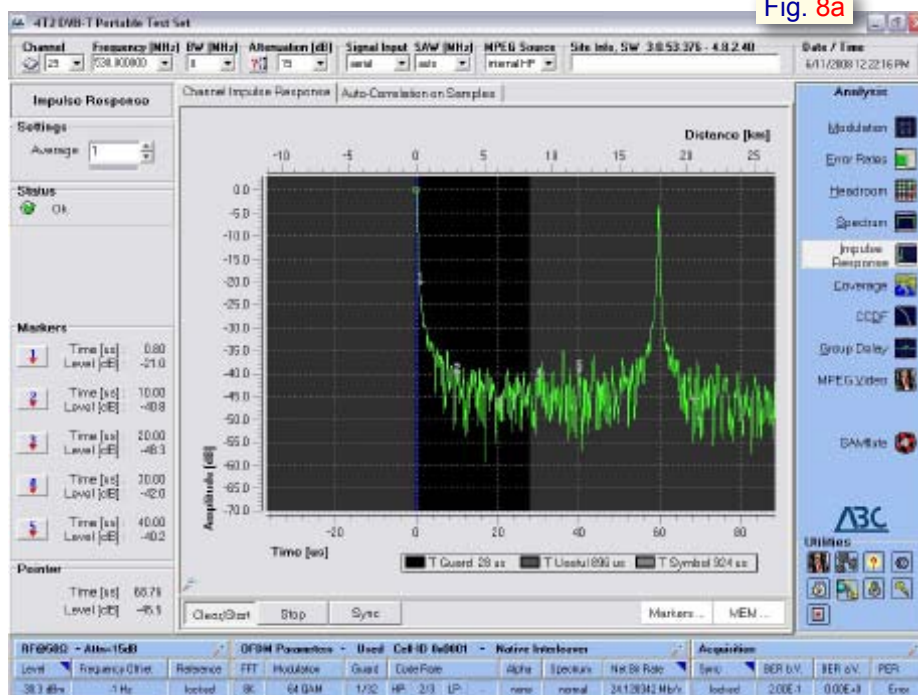



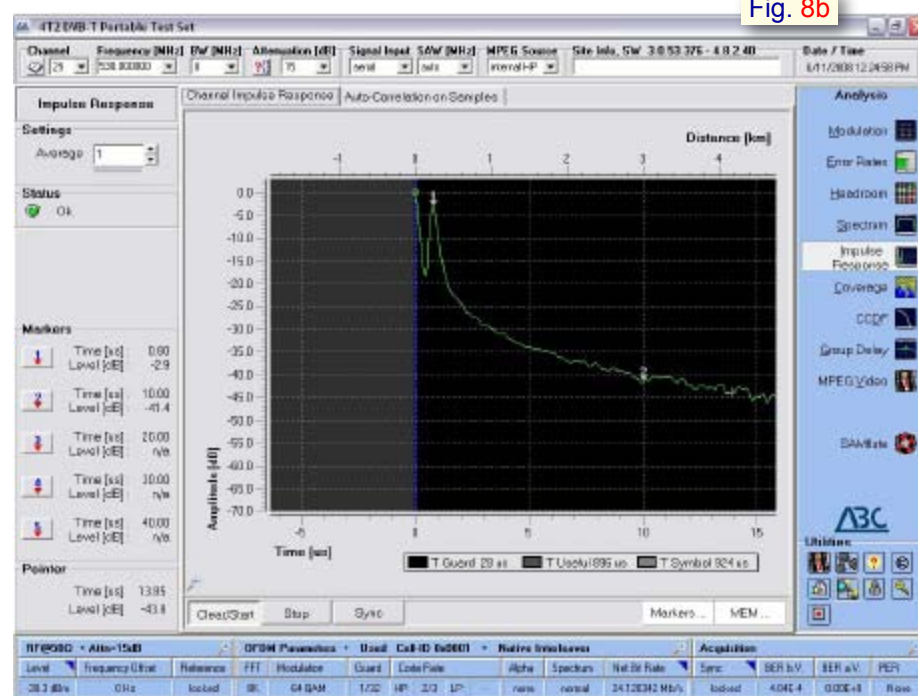
Fig. 8b

Nota 15 - La risoluzione temporale è il reciproco della banda del segnale, quindi 1/(7.61 MHz) = 130 ns.

Fig. 8 –

Un'eccezione è il parametro CELL_ID, che può essere diverso per ogni trasmettitore. Ma questo parametro è mappato su delle sottoportanti OFDM di segnalazione, che non partecipano al trasporto di bit informazione. Il ricevitore quindi non ne è influenzato.

15. "Esistono svantaggi nell'utilizzo di una rete SFN?"

Sì. Citiamo ad esempio:

a) **Minore capacità**. Per accomodare al ricevitore i ritardi dei segnali provenienti da trasmettitori distanti, l'intervallo di guardia viene in genere dimensionato a valori elevati (fino a T_g=1/4 in FFT=8k). Questo significa sacrificare capacità trasmissiva nella misura di $T_g/(1+T_g)$. L'esempio estremo: con T_g=1/4, $T_g/(1+T_g)$ = 0.2 = 20%. Il risultato è tragico: anziché (ad esempio) trasmettere 24.128 Mb/s se ne trasmetteranno 19.91.

b) **Costo apparati.** SFNadapter e GPS aggiuntivi.

c) **Ritardo aggiuntivo.** La rete introduce un ritardo fisso pari a Maximum_Delay, parametro impostabile nell'SFN adapter, che non può essere inferiore al tempo di propagazione del segnale tra l'SFN adapter stesso ed il più lontano trasmettitore tra quelli in rete. Il valore può raggiungere 1 secondo. Questo ritardo si somma a quello di codifica video. Una oculata ottimizzazione è opportuna.

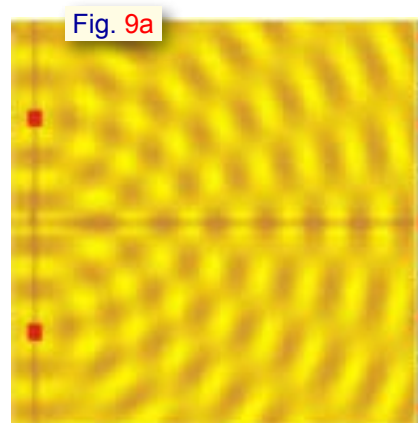
d) **Conduzione della rete.** Si può prevedere che una rete SFN debba essere controllata con continuità per evitare che guasti sugli apparati possano causare una dissincronizzazione dei TX.

e) **Rischio di gravi fuori-servizio su grosse aree** in caso di avaria di apparati che causino la mancanza di sincronizzazione di un Tx (come accennato sopra in 8.).

APPENDICE

Maggiori dettagli sull'interferenza di onde coerenti

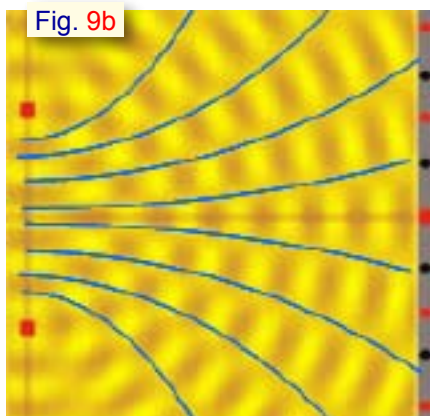
Consideriamo due sorgenti di onde coerenti, disposte nello spazio ad una certa distanza tra loro. Le sorgenti emettono onde a frequenza f, che si propagano nello spazio. La sovrapposizione (somma) di tali onde crea una configurazione di massimi e minimi. Questo fenomeno viene chiamato interferenza. In figura 9a è mostrata un'istantanea (immagine statica[Nota 16]) della situazione, ma in realtà la configurazione di massimi e minimi si muove nello spazio. I due punti rossi sulla destra sono le sorgenti.

Fig. 9a

Ha luogo un massimo (interferenza costruttiva) quando la relazione di fase tra le onde che si sovrappongono in quel punto dello spazio è tale da avere onde in fase; viceversa si ha un nullo, interferenza distruttiva, quando risultano in controfase.

La differenza di fase è proporzionale alla differenza di cammino ottico delle onde, quindi in definitiva dalla differenza di distanza delle due sorgenti da quel punto dello spazio.

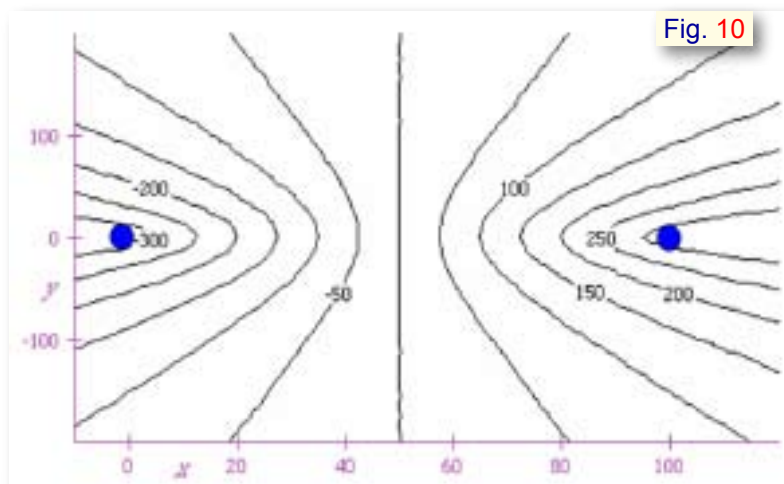
Nota 16 - La figura animata è visibile su http://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_di_Young

Fig. 9b

Fig. 10

Ma il *luogo dei punti la cui differenza delle distanze da due punti fissi (detti fuochi) è costante* è l'iperbole. Quindi (figura 9b) avremo una famiglia di iperboli che definisce punti dello spazio "iso-ritardo-differenziale", in cui tutti i punti sono massimi o minimi, a seconda della fase. Nella figura 10, in cui i due *fuochi*, alias *sorgenti di onde*, alias *trasmettitori*, sono allineati in orizzontale, ascissa e ordinata sono tarate in km. Le curve sono parametrizzate in nanosecondi di ritardo differenziale.

Queste considerazioni valgono, di principio, per onde sinusoidali. La configurazione di campo vale dunque per una determinata frequenza. Ad una frequenza diversa la relazione di fase spaziale cambia, quindi cambia (risulta scalata) la configurazione di massimi e minimi. Se il segnale di interesse occupa una certa banda –nel nostro caso un canale TV- il fenomeno dell'interferenza si verifica frequenza per frequenza. La successione di massimi e minimi cambierà frequenza per frequenza.

Vediamo più nel dettaglio, aiutandoci con strumenti analitici.

Chiamiamo X(f) il segnale nel dominio della frequenza trasmesso identicamente dai due trasmettitori. Al ricevitore pervengono due contributi: per il primo dei due assumiamo nulla l'attenuazione di tratta e normalizziamo a zero ritardo e fase. Quindi assumiamo che tale contributo sia ancora X(f). Assumiamo invece che il secondo contributo sia attenuato (rispetto al primo) di un fattore R, che rende conto dell'attenuazione di tratta dal secondo TX. Inoltre questo segnale avrà totalizzato un ritardo di fase $2\pi f\tau$, dove τ è il ritardo differenziale temporale. Il secondo contributo risulta dunque $R \bullet X(f)\, e^{j2\pi f\tau}$

Il segnale ricevuto è quindi (figura 11a):

$$X(f) = Y(f) + R \bullet X(f)\, e^{j2\pi f\tau} =$$

$$= X(f)\,[1 + R \bullet e^{j2\pi f\tau}]$$

Modellando il sistema come un filtro lineare (figura 11b), con ingresso X(f) e uscita Y(f), possiamo calcolare la risposta in frequenza C(f)=Y(f) / X(f). Si ha:

$$C(f) = Y(f) / X(f) = 1 + R \bullet X(f)\, e^{j2\pi f\tau}$$

Come si vede, C(f) ha valore complesso, e dipende dalla frequenza. Quello che vediamo su un analizzatore di spettro è l'andamento con la frequenza della potenza (quindi del modulo al quadrato) del segnale. Nel caso dell'OFDM, X(f) è grosso modo costante con la frequenza, nel canale. Quindi il modulo Y(f) varia come il modulo di [1 + R•X(f)] . Ma quest'ultimo è sostanzialmente la soma di due vettori, di cui uno reale, unitario, e l'altro di modulo R, che ruota con f.

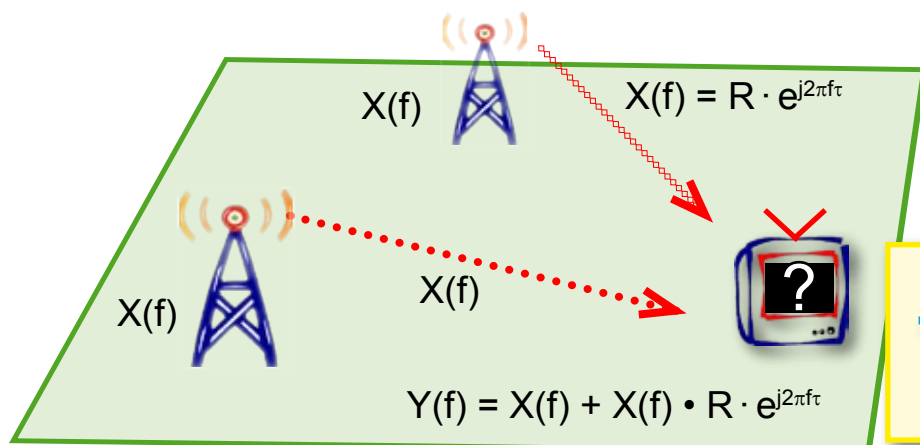



Fig. 11a

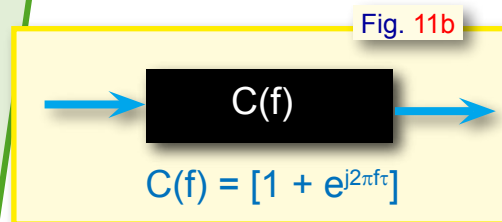



Fig. 11b

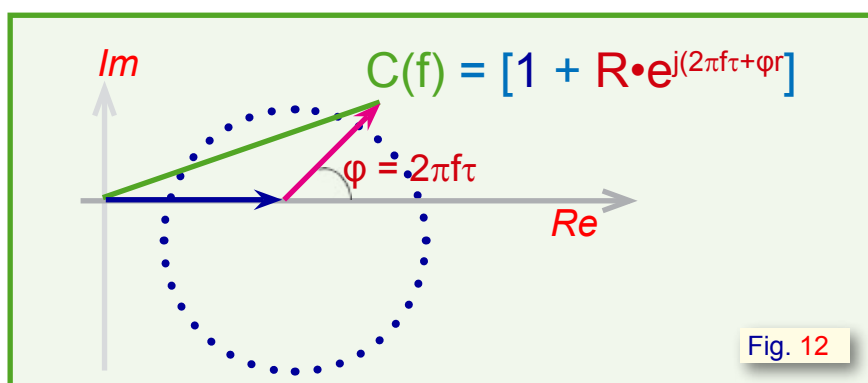



Fig. 12

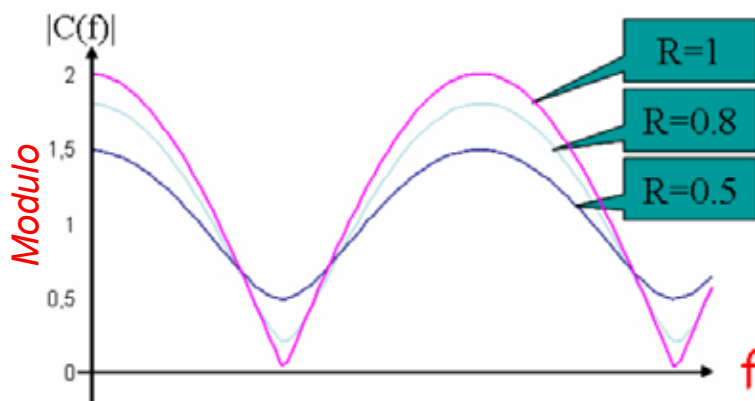



Fig. 13

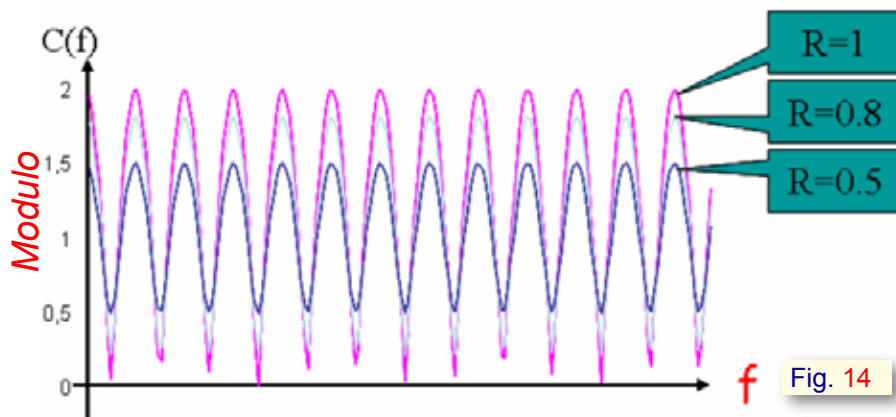



Fig. 14

E'facile visualizzare che il modulo di $[1+R \cdot X(f)\, e^{j2\pi f\tau}]$, cioè la lunghezza del vettore verde in figura 12, sale e scende al crescere di f. All'aumentare del parametro τ la velocità di crescita dell'argomento dell'esponenziale aumenta, e quindi la frequenza dell'ondulazione. Da R dipende la profondità dell'ondulazione. Nelle figure 13 e 14 le ordinate sono in scala lineare. Usando l'analizzatore di spettro le stesse curve risultano un po' più pronunciate dalla scala logaritmica.

A Torino, il primo esperimento di diffusione in Italia

Sommario
Il primo esperimento in Italia di diffusione di un multiplex basato sul nuovo standard DVB-T2 è avvenuto a Torino. Presso il Centro Ricerche Rai si è tenuto un incontro con i professionisti del settore che hanno potuto valutare le prestazioni del sistema. Grazie all'uso della codifica MPEG-4 AVC e all'incremento di capacità trasmissiva è stato possibile diffondere un multiplex costituito da quattro programmi in alta definzione (HDTV), utilizzando un canale del trasmettitore RaiWay dell'Eremo (Torino).

1. L'esperimento

Una descrizione approfondita dello standard DVB-T2 e delle caratteristiche che rendono possibile il successo di questa evoluzione del sistema di diffusione digitale terrestre è oggetto dell'articolo che segue [1].

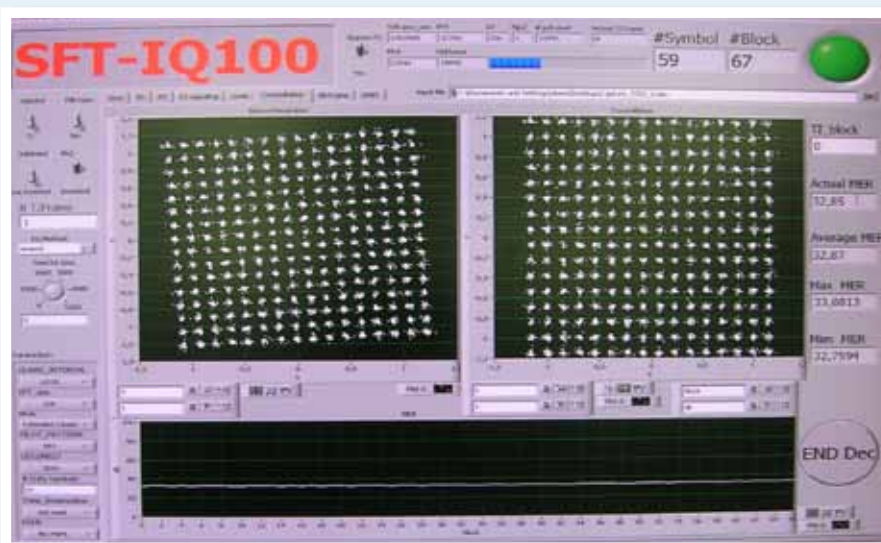
Il percorso di ricerca e sviluppo che ha portato alla definizione di questo nuovo standard comprende una tappa significativa: la prima diffusione sul territorio italiano di un multiplex DVB-T2. Per la Rai l'iniziativa è stata condotta dalla Direzione Strategie Tecnologiche con la Direzione Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica, in collaborazione con RaiWay S.p.A.

Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai ha partecipato attivamente alla definizione di questo nuovo standard. L'italiana ScreenService S.p.A. e la spagnola SIDSA hanno sviluppato rispettivamente il trasmettitore ed il ricevitore DVB-T2.

Questa sperimentazione tecnologica, per ora concentrata nell'area torinese, consentirà di realizzare "prove in campo" delle caratteristiche del DVB-T2, sia per gli aspetti propagativi che per quelli di robustezza e resistenza alle interferenze in diverse condizioni operative.

Attualmente l'Industria manifatturiera sta sviluppando i primi prototipi di ricevitori per essere in grado di fornire i decoder in Gran Bretagna già nel 2010, quando ci sarà il lancio del servizio HDTV regolare.

Accensione del sistema di diffusione DVB-T2, presso il trasmettitore Rai dell'Eremo (Torino) avvenuta il 19 novembre 2008.

A destra il dettaglio della costellazione 256-QAM ruotata.

Il 16 dicembre, a Torino, si è tenuto un incontro organizzato presso il Centro Ricerche della Rai a cui hanno partecipato numerosi professionisti del settore.

Nel corso dell'evento è stato possibile valutare le prestazioni del sistema e l'incremento di capacità grazie alla diffusione dal trasmettitore di Torino Eremo di un multiplex costituito da ben quattro programmi HDTV codificati MPEG-4 AVC.

Tre programmi erano riprodotti grazie ad un server locale mentre il quarto era realizzato mediante ripresa dal vivo della sala in cui si teneva conferenza, utilizzando una telecamera HDTV a piena risoluzione (1920 pixel, 1080i).

Bibliografia

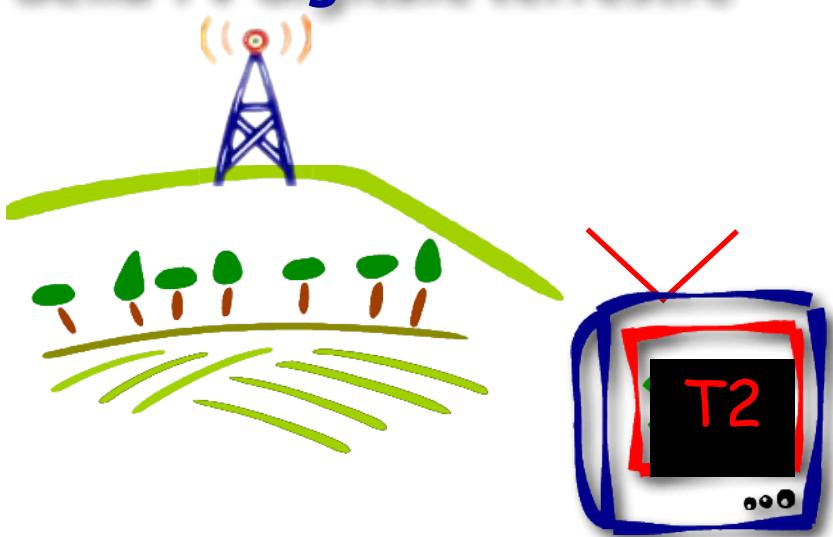
1. V. Mignone, A. Morello, G. Russo, P. Talone, "DVB-T2: la nuova piattaforma di diffusione della TV digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 3, dicembre 2008.

Le immagini HDTV, riprese nella sala dove si teneva l'incontro, erano codificate e inviate mediante la catena Screen Service al trasmettitore RaiWay di Torino Eremo, diffuse sul canale UHF 29, ricevute e decodificate grazie al prototipo di ricevitore della SISDA.

A destra - il Direttore del Centro Ricerche, Alberto Morello, illustra le caratteristiche e le migliorate prestazioni del sistema DVB-T2.

In basso - per consentire di apprezzare anche la qualità audio offerte dagli standard DVB, l'incontro si è concluso con l'Ave Maria di Schubert interpretata dal tenore Andrea Del Principe.

DVB-T2

la nuova piattaforma di diffusione della TV digitale terrestre

ing. Vittoria **Mignone**
ing. Alberto **Morello**
Rai
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

ing. Giuseppe **Russo**
ing. Paolo **Talone**
Fondazione Ugo Bordoni
Roma

Sommario

E' nato il DVB-T2, la nuova piattaforma di televisione digitale per diffusione terrestre verso terminali fissi o portatili, venuto alla luce a poco più di un decennio di distanza dallo standard attualmente in esercizio (DVB-T). Ha prestazioni vicine all'ottimo teorico, e offre tangibili vantaggi in termini di incremento di capacità trasmissiva a parità di banda occupata, oppure di copertura radio a parità di potenza emessa rispetto al DVB-T. L'incremento di capacità trasmissiva si può quantizzare in quasi il 50%; con le nuove codifiche di sorgente (MPEG-4 AVC) questo vantaggio diventa schiacciante: circa il 300% se si ragiona in termini di numero di programmi trasportabili a pari qualità. In realtà la coppia DVB-T2 / MPEG-4 non è solo la tecnologia per triplicare i programmi trasportati da un multiplex DTT a parità di banda occupata, ma soprattutto è il driver ideale per l'introduzione della televisione ad alta definizione, che può sostituire quella tradizionale senza quasi provocare decremento del numero programmi attualmente diffusi. Il passaggio al DVB-T2 non implica modifiche rilevanti nei siti trasmittenti e nelle antenne riceventi a casa dell'utente, ma richiede la sostituzione dei ricevitori che, con l'occasione, potrebbero adeguarsi alla ricezione della TV ad alta definizione, comunque non possibile con i decoder attuali a standard DVB-T.

Questo articolo fornisce una descrizione delle tecnologie utilizzate dal sistema DVB-T2 e presenta alcuni risultati simulativi che dimostrano come il sistema definito soddisfi ed in qualche caso superi significativamente i requisiti commerciali alla base del processo di standardizzazione.

1. I perchè della nascita e i fattori per l'affermazione

Diversi paesi hanno dimostrato, nel recente passato, interesse allo sviluppo di nuovi standard di diffusione per la televisione digitale in grado di assicurare prestazioni superiori rispetto ai sistemi in uso ed ormai consolidati da anni. In particolare, il riferimento è agli standard sviluppati negli anni '90 dal consorzio DVB [1], vanto della tecnologia europea e attualmente più adottati nel mondo: rispettivamente il DVB-S per la diffusione satellitare e il DVB-T per quella terrestre, oggi identificati come sistemi DVB di prima generazione.

Il compito di definire le "tecnologie di seconda generazione" è stato ancora una volta affidato al DVB, che ha realizzato le nuove piattaforme di TV digitale, DVB-S2 [2,3] e DVB-T2 [4,5], rispettivamente per diffusione satellitare e terrestre, verso terminali fissi.

Le opportunità per definire le nuove piattaforme si sono presentate, come di consueto, quando la diminuzione dei costi dei microcircuiti ha permesso di realizzare, anche per ricevitori domestici, soluzioni tecnologiche molto più complesse e fino a ieri troppo costose. Le nuove tecnologie, pur restando nel solco delle precedenti, ne ottimizzano a fondo le potenzialità.

In particolare (sia nel terrestre che nel satellitare) è stato possibile introdurre algoritmi di correzione d'errore particolarmente avanzati, con prestazioni

Acronimi e sigle

ACE	Active Constellation Extension
ASI	Asynchronous Serial Interface
ATM	Asynchronous Transfer Mode
AVC	Advanced Video Coding
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BBFRAME	Base Band Frame
BCH	Bose, Ray-Chauduri, Hocquenghem (codice di...)
BER	Bit Error Rate
BICM	Bit Interleaved Coded Modulation
CD3	Coded Decision Directed Demodulation
CfT	Call for Technologies
CP	Continual Pilots
CPE	Common Phase Error
DA	Data-Aided
DAB	Digital Audio Broadcasting (www.dab.it)
DBPSK	Differential Binary Phase Shift Keying
DRM	Digital Radio Mondiale (www.drm.org)
DTT	Digital Terrestrial Television www.dgtvi.it
DVB	Digital Video Broadcasting, (www.dvb.org)
EIT	Event Information Table
EPG	Electronic Program Guide
FEC	Forward Error Correction
FEF	Future Extension Frame
FFT	Fast Fourier Transform
GSE	Generic Stream Encapsulation
HDTV	High Definition TeleVision
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting -Terrestrial (www.dibeg.org)
IRD	Integrated Receiver Decoder
IP	Internet Protocol
IS	Input Stream
ITU	International Telecommunication Union (www.itu.int)
LDPC	Low Density Parity Check
MFN	Multi Frequency Network
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MISO	Multiple Input Single Output
MPEG	Motion Picture Expert Group
MRRC	Maximal Ratio Receive Combining
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAL	Phase Alternating Line
PAPR	Peak to Average Power Ratio
PLP	Physical Layer Pipe
PCR	Program Clock Reference
PSI/SI	Program Service Information/ Service Information
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RS	Reed-Solomon (codice di...)
SFN	Single Frequency Network
SP	Scattered Pilots
SISO	Single Input Single Output
TFS	Time Frequency Slicing
TR	Tone Reservation
TS	Transport Stream
VCM	Variable Coding & Modulation

tali da rendere possibile l'impiego di modulazioni di ordine più elevato, con un conseguente incremento di capacità trasmissiva, dell'ordine del 20-30%. Inoltre, le nuove piattaforme permettono di assegnare caratteristiche di protezione ed efficienza spettrale differenti a ciascun servizio trasportato, a seconda delle caratteristiche e dei requisiti commerciali dello stesso. Entrambi gli standard (DVB-S2 e DVB-T2) infatti sono sistemi di livello fisico e forniscono ai livelli superiori di protocollo un insieme di "Tubi trasparenti" (PLP nel DVB-T2, IS per il DVB-S2) in grado di trasportare flussi a bit-rate variabile con protezione differenziata (modulazione e codifica, VCM) contro il rumore e le interferenze.

E' quindi possibile (con tecniche differenti) suddividere un MUX-statistico nei singoli programmi, inviare ciascuno su un PLP diverso ed ottenere su ciascuno (o su gruppi) protezione / efficienza spettrale differenziate, come schematicamente illustrato nella figura 1.

Nel terrestre poi, la modulazione multiportante (OFDM), già adottata dallo standard di prima generazione, perché più adatta a contrastare gli echi in scenari multicammino, aumenta ora il numero delle portanti, con conseguente riduzione percentuale dei tempi di guardia necessari per contrastare i fenomeni propagativi. Grazie a ciò, e alla flessibilità di scelta dei parametri di sistema, quali le portanti pilota necessarie per l'equalizzazione del canale, il DVB-T2 permette di ridurre significativamente gli overhead[Nota 1] in modo tale da ottenere un sistema con prestazioni il più possibile prossime al limite teorico e con caratteristiche trasmissive ottimali. Indicativamente è possibile aumentare la capacità del canale del 30 - 50%, rispetto al DVB-T.

Inoltre il DVB-T2 introduce tutta una serie di nuove tecniche (quali la possibilità di utilizzo di antenne multiple in trasmissione in modalità MISO, riduzione dei picchi di potenza del segnale OFDM mediante le tecniche di PAPR,...) che verranno descritte in dettaglio nel resto dell'articolo e che consentono uno sfruttamento ottimale delle risorse.

Globalmente il risultato sono piattaforme di seconda generazione di complessità ragionevolmente accessibile con le tecnologie attuali e prestazioni

Nota 1 – Con *overhead* si indicano le risorse aggiuntive, ad esempio per sincronismi e protezione dagli errori, rispetto ai dati trasportati (indicate come *payload*), ad esempio le informazioni audio e video.

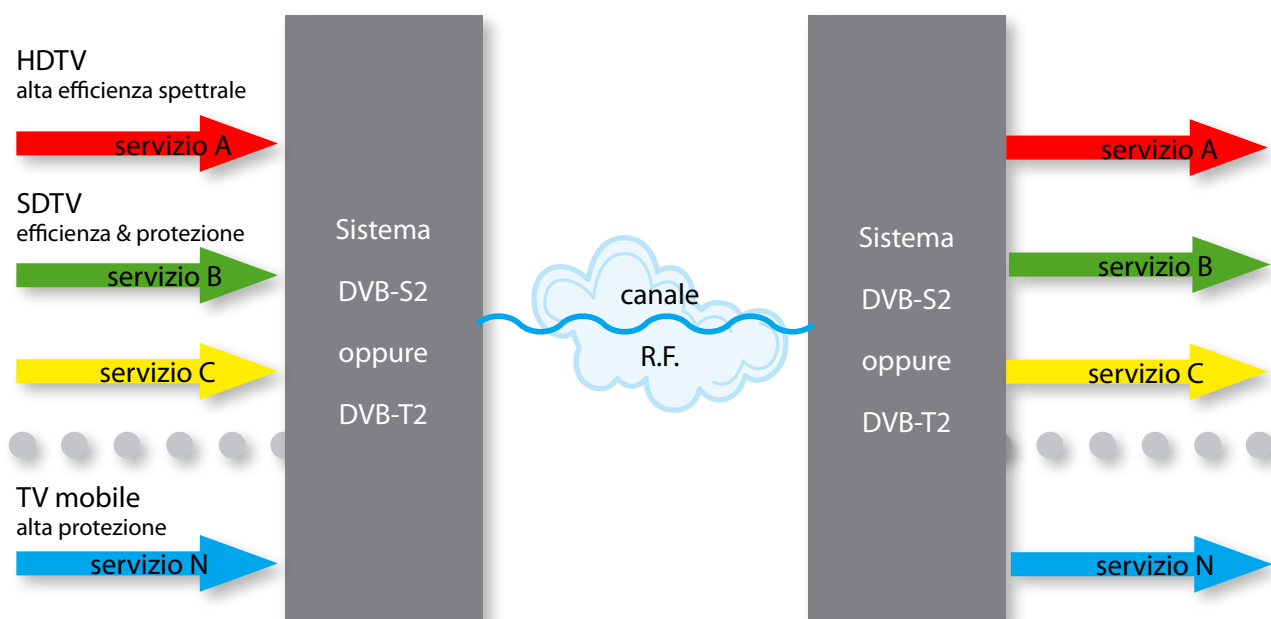



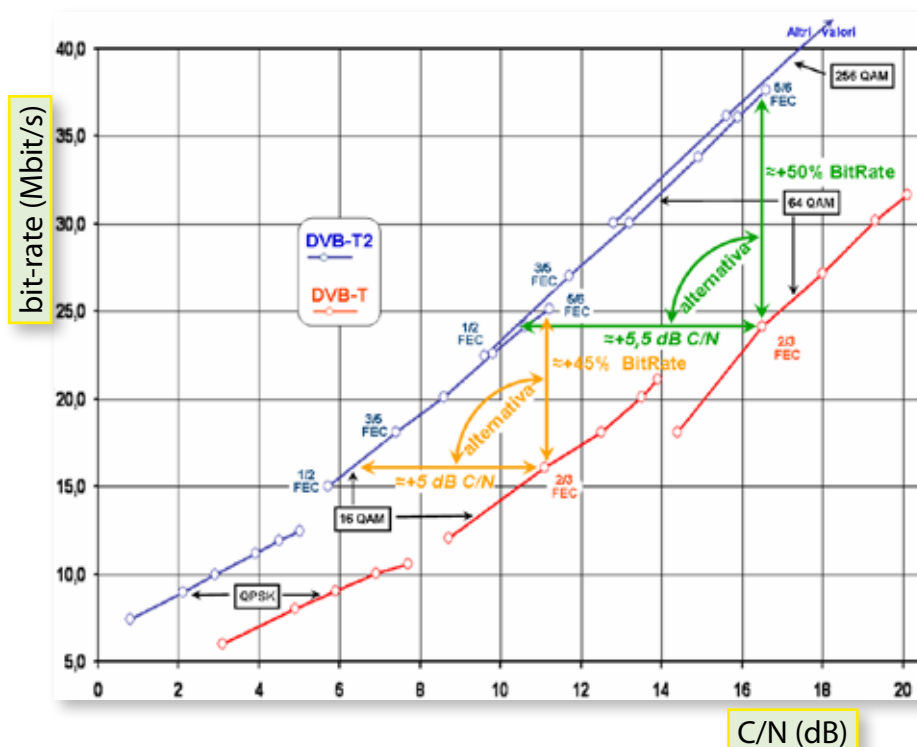
Fig. 1 – Caratteristiche di robustezza in funzione del tipo di servizio.

e flessibilità molto superiori rispetto ai precedenti sistemi DVB, risultanti in un "guadagno", rispetto ai sistemi di prima generazione, spendibile in due modi:

- Aumento dell'efficienza spettrale; ovvero più bit/s/Hz. In altri termini, a parità di banda, più canali TV oppure canali TV a qualità più alta.
- Aumento dell'efficienza energetica; ovvero maggior copertura del territorio a parità di siti trasmittenti e della loro potenza; oppure diminuzione della potenza dei siti a parità di copertura del territorio.

Nella figura 2 è illustrata la curva capacità/prestazioni per i sistemi DVB-T e DVB-T2. Come si può vedere dal grafico, il guadagno del DVB-T2 può consistere in un aumento del 45÷50 % di capacità trasmissiva (in verticale) o, in alternativa, in 5÷6 dB aggiuntivi di rapporto segnale/rumore (in orizzontale) rispetto alle prestazioni assicurate dal precedente DVB-T.

Le motivazioni della scelta sul come spendere il "guadagno" sono dettate dalla spinta concorrenziale provocata dalle esigenze di mercato, che tendono generalmente verso l'aumento dell'offerta di "canali" o verso "canali" a maggiore qualità (HDTV). Le nuove piattaforme per diffusione verso terminali fissi (terrestre e satellitare) sembrano pertanto volte essenzialmente a preferire l'aumento dell'efficienza spettrale a parità di banda occupata e di impianti trasmissivi, con la motivazione "forte" di sostituire la televisione ad alta definizione a quella a qualità standard. Tutto ciò a parità di risorse frequenziali e (quasi) a parità di programmi. In alternativa, restando nel campo della qualità standard, la triplicazione dei programmi. Nel caso terrestre, quest'ultima motivazione dovrebbe far risuonare le corde di tutti gli attori della filiera televisiva, in tempi di redistribuzione delle risorse frequenziali terrestri a favore di servizi differenti dalla televisione.

Figura 2 - Guadagno del DVB-T2 rispetto al DVB-T in termini di efficienza spettrale e/o rapporto segnale/rumore. Nella figura sono riportati due esempi tratti dai dati che verranno illustrati, al termine dell'articolo, in § 12.

Esempio arancio:
partendo da una modulazione DVB-T 16 QAM 2/3 è possibile guadagnare
≈ 45% di BitRate con un DVB-T2 16 QAM 5/6
– oppure –
≈ 5 dB di rapporto segnale rumore con un DVB-T2 16 QAM ½ oppure 3/5.

Esempio verde:
partendo da una modulazione DVB-T 64 QAM 2/3 è possibile guadagnare
≈ 50% di BitRate con un DVB-T2 64 QAM 5/6
– oppure –
≈ 5,5 dB di rapporto segnale rumore con un DVB-T2 64 QAM ½ oppure 3/5.

Per ottenere i vantaggi sopramenzionati e, segnatamente per il lancio di servizi di diffusione televisiva ad alta definizione, che avverrà in maniera significativa nei prossimi anni, non è tuttavia sufficiente l'aumento di efficienza spettrale offerto dalla piattaforma di diffusione. Il quadro è completato dalla possibilità di adottare la codifica di sorgente MPEG-4 AVC [6,7] che può portare ad risparmio, in termini di bit-rate e a parità di qualità, superiore al 50%[8].

L'MPEG-4 AVC è naturalmente applicabile sia a programmi HDTV che SDTV e richiede, come del resto il DVB-T2, il rinnovo del parco dei ricevitori d'utente (IRD), comunque di costo irrilevante rispetto a un display a schermo piatto (HD-ready o Full-HD). Naturalmente nulla vieta l'impiego della nuova codifica di sorgente con le vecchie piattaforme DVB-T e DVB-S, così come è possibile veicolare sulle nuove piattaforme la tradizionale codifica di sorgente MPEG-2, nel formato SD. Tuttavia, proprio perché anche solo un'adozione parziale dei nuovi sistemi richiede il rinnovo del parco degli IRD d'utente, è necessario sia che il rinnovo sia completo (per le nuove codifiche di sorgente e, contemporaneamente, per le nuove codifiche di canale), sia che venga addotta una motivazione "forte" per vincere la ritrosia all'adozione della tecnologia più efficiente ma incompatibile con gli apparati già commercializzati. La motivazione probabilmente sarà il nuovo servizio HDTV che, privo di una codifica di sorgente efficiente, occuperebbe una banda troppo larga per una diffusione commerciale e, privo di una efficiente codifica di canale, penalizzerebbe in maniera eccessiva il numero dei programmi irradiabili.

Nel seguito, dopo queste considerazioni preliminari sui vantaggi competitivi e sulle problematiche per l'introduzione delle nuove piattaforme, si riportano una breve storia e le caratteristiche tecniche dello standard DVB-T2.

2. Breve storia del DVB-T2

Nel 2006 nasce, in ambito DVB, un gruppo di lavoro ad-hoc focalizzato sugli obiettivi di definire una nuova piattaforma per la televisione digitale terrestre. Il gruppo è denominato TM-T2 e coordinato da N. Wells, BBC Research. Il primo obiettivo del gruppo è l'analisi delle possibili nuove tecnologie di interesse per una nuova piattaforma per il digitale terrestre, sulla base dei cui risultati il modulo commerciale del DVB sviluppa i requisiti commerciali richiesti al futuro standard.

Nell'aprile 2007, dopo l'approvazione del documento di specifica dei requisiti commerciali, viene lanciata una richiesta di proposte tecniche (CfT [9]) volte al soddisfacimento di detti requisiti.

Alla scadenza del CfT, Giugno 2007, vengono raccolte 31 proposte, fra cui quella del Centro Ricerche Rai, e nel Luglio 2007 iniziano le attività di standardizzazione vera e propria, suddivisa in 5 aree tecniche: System (responsabile: F. Herrmann, Panasonic,); MUX&Interleaving (A. Morello, Rai),Signalling, Synchronisation e Sounding (A. Filippi, Philips); Modulazioni (P. J. Bouvet, NXP) PAPR (R. Rajagopal, AMD) .

Nel giugno 2008, dopo un anno di intenso lavoro, cui hanno partecipato attivamente circa 70 esperti appartenenti a più di 40 aziende, il DVB vara il "Blue-Book A122" che costituisce il DVB-T2, lo standard di seconda generazione per la televisione digitale terrestre, e lo propone in ETSI per divenire "Norma Europea" [4].

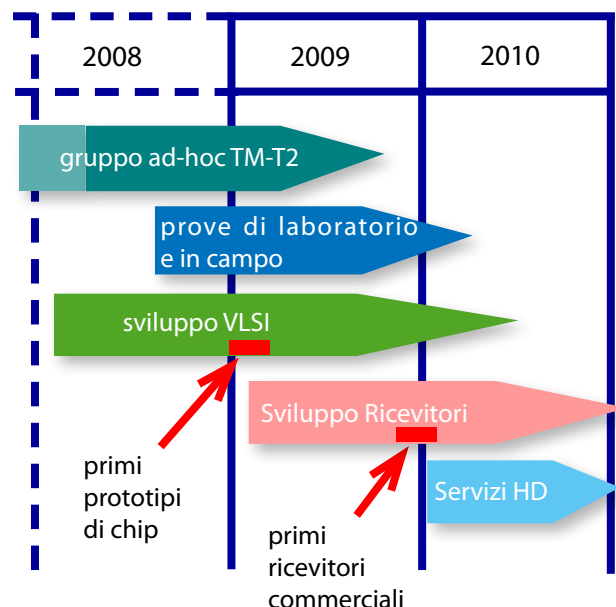



Fig. 3 - Previsione di evoluzione temporale della tecnologia DVB-T2.

Nella figura 3 è riportato il diagramma temporale adottato dal gruppo di lavoro TM-T2 per i prossimi anni: la prevista stabilizzazione dello standard e lo sviluppo delle relative implementazioni.

In attesa dell'approvazione da parte dell'ETSI, sono iniziati i primi test in laboratorio e sul campo.

Nel mese di novembre 2008 la Rai ha attivato dal Centro Trasmittente di Torino-Eremo la prima trasmissione in Italia di HDTV digitale terrestre basata sul DVB-T2. L'iniziativa è stata condotta dal Centro Ricerche Rai, in collaborazione con l'operatore di rete RaiWay SpA, l'italiana ScreenService SpA e la spagnola SIDSA, che tra i primi hanno sviluppato rispettivamente il trasmettitore ed il ricevitore DVB-T2.

Il progetto di microcircuiti commerciali a basso costo per i ricevitori, già iniziata al momento delle prime bozze stabilizzate dello standard, dovrebbe concludersi contemporaneamente alle sperimentazioni, per consentire poi la loro commercializzazione e la produzione degli IRD domestici. Entro il 2009 è prevista la produzione dei microcircuiti commerciali e di conseguenza la commercializzazione dei primi decoder. La Gran Bretagna prevede l'utilizzo del sistema per il lancio, entro fine 2009, del nuovo servizio HDTV terrestre.

3. Requisiti commerciali del sistema DVB-T2

Per comprendere le scelte tecniche operate dal gruppo di standardizzazione, è necessario conoscere i requisiti commerciali che le hanno guidate.

I principali requisiti definiti dal modulo commerciale del DVB per lo standard di seconda generazione di TV digitale terrestre comprendono:

- utilizzo degli impianti d'antenna domestici esistenti e dell'attuale infrastruttura di trasmettitori. Questo requisito, che evita il rinnovo degli impianti riceventi domestici, ha però impedito l'adozione di tecniche di trasmissione basate sulla ricezione con antenne multiple (MIMO), che pur offrono grandi vantaggi nella radiocomunicazione terrestre, limitando le innovazioni alla definizione di un sistema ad antenne trasmittenti multiple (MISO).
- incremento di almeno il 30 % della capacità trasmissiva rispetto al DVB-T, pur con gli stessi vincoli di occupazione spettrale;
- prestazioni superiori per SFN.
- meccanismi per fornire caratteristiche di robustezza in funzione del tipo di servizio. Ad esempio è possibile, sullo stesso canale a radiofrequenza, "tagliare" servizi per la ricezione fissa con antenna sul tetto e altri servizi per la ricezione su apparati portatili.
- flessibilità relativamente a frequenze operative e larghezza di banda;
- meccanismi per ridurre il rapporto tra potenza di picco e media, ottenendo vantaggi sulle emissione elettromagnetiche e sul costo dei trasmettitori.

Nella tabella 1, tratta dal CfT, è riportato l'elenco completo dei requisiti di tipo commerciale il cui soddisfacimento ha costituito l'obiettivo alla base dei lavori del gruppo tecnico che ha prodotto lo standard DVB-T2.

4. Overview del sistema DVB-T2

La specifica DVB-T2, recentemente approvata dal consorzio DVB ed inviata all'ETSI per l'approvazione, comprende le seguenti caratteristiche principali:

- Stessa tecnica base di modulazione utilizzata dal DVB-T, OFDM con intervallo di guardia, che garantisce un sistema di trasmissione affidabile su canali terrestri.
- Dimensioni di FFT estese rispetto al DVB-T, per migliorare le prestazioni in configurazioni di rete a frequenza singola (SFN) e, congiuntamente, incremento dei possibili valori degli intervalli di guardia, per offrire maggiore flessibilità di scelta di configurazione del sistema, in relazione alle caratteristiche della rete di trasmissione, e garantire un'efficienza trasmissiva significativamente più elevata rispetto al DVB-T

Requisiti	Caratteristiche richieste alle specifiche DVB-T2
Tipi di ricezione	**Ricezione fissa** con possibilità di configurazioni (come DVB-T) per ricezioni portatili e mobili.
Vincoli frequenziali	Trasmissione entro i livelli di interferenza e le maschere spettrali definite in "GE06 Agreement, Geneva 2006" e senza ulteriori interferenze rispetto al DVB-T.
Capacità trasmissiva	Massimo incremento della capacità trasmissiva netta rispetto al DVB-T in simili condizioni, (almeno del del 30% per ogni canale) con migliori caratteristiche di robustezza.
Trattamento dei flussi	- Trasporto dell'MPEG2 Transport Stream ed anche del GSE (Generic Stream Encapsulation) definito dal DVB; - Trasporto simultaneo di più flussi di trasporto DVB in un singolo canale; - Possibilità di una efficiente multiplazione statistica dei flussi in ingresso. - Conseguenti modifiche alle SI (Service Information) del Transport Stream da recepire nelle specifiche DVB SI.
Robustezza	- Maggiore robustezza , rispetto al DVB-T, nei confronti di interferenze provenienti da altri trasmettitori, incrementando con ciò la possibilità di riuso delle frequenze; - Differenti livelli di protezione da applicare uniformemente a tutti i dati del "Transport Stream" trasportato dal DVB-T2 in un particolare canale; - Possibile applicazione separata di differenti livelli di protezione a ciascun servizio all'interno del "Transport Stream" trasportato in un particolare canale. Quando viene trasportato più di un TS, DVB-T2 deve offrire una scelta di differenti livelli di protezione da applicare separatamente per ciascun TS; - Q.o.S. che assicuri, attraverso l'intero canale, non più di un grave disturbo (corrupted event) (audio o video) per ciascuna ora di ciascun servizio HDTV e SDTV - Prestazioni nei confronti di rumore impulsivo sostanzialmente migliori di quelle del DVB-T.
Velocità di adattamento	- Rivelazione automatica, entro ½ s, delle variazioni delle opzioni di modulazione. Sebbene il ricevitore potrebbe non essere in grado di adattarsi automaticamente (seamless changeover). - Non più di 0.3 s di ritardo addizionale nello zapping (cambio canale), rispetto a DVB-T.
Ri-uso infrastruttura DVB-T	Ri-uso dei siti e tralicci di trasmissione, antenne e cavi delle installazioni domestiche usati per il DVB-T.
Costi	- Riduzione, rispetto al DVB-T, del costo dei trasmettitori, a parità di potenza, sia in termini di investimento sia di costi di gestione. - Economicità nella realizzazione della copertura di aree locali, regionali e nazionali nel contesto della normative sull'allocazione delle spettro radio. Ad esempio ottimizzando I costi delle infrastrutture e l'uso dello spettro con tecniche SFN e/o MFN.
SFN	- Realizzazione di reti SFN su scala più larga rispetto al DVB-T. In una rete SFN la massima distanza tra trasmettitori adiacenti deve essere incrementata di almeno il 30% rispetto a quella offerta da un DVB-T con modalità 8K ed il medesimo livello di mutua interferenza. - Sviluppare di "gap filler" economici e conformi alla normative; allo scopo di una agevole copertura indoor.

Tab. 1 - Requisiti del DVB-T2

- Tecnica di suddivisione dei dati in trame (*frame*) di banda base (BBFRAME) e codifica di canale (FEC) analoghe a quella del DVB-S2.
- Stesse costellazioni del DVB-T (4-, 16-, 64-QAM), con estensione alla 256-QAM, per sfruttare a pieno i vantaggi derivanti dall'impiego della nuova generazione di FEC. Introduce la tecnica delle costellazioni ruotate che consente di migliorare significativamente le prestazioni del sistema in canali terrestri particolarmente critici.
- Metodo per trasportare servizi differenti con differenti gradi di protezione, in un unico canale fisico, ma diversi canali logici, denominati PLP. Ciascun PLP adotta FEC ed Interleaving indipendenti, consentendo così di adattare le caratteristiche di robustezza della codifica ai requisiti del particolare servizio convogliato. Ciò consente inoltre il "Time slicing" nello strato fisico, per un risparmio energetico nel ricevitore, che può rimanere acceso solo negli intervalli temporali in cui è presente il servizio di interesse.
- Quattro livelli di interallacciamento dell'informazione (Bit, Cella, Tempo e Frequenza), per fronteggiare meglio i diversi tipi di degradamento del segnale sul canale terrestre. L'interleaving temporale offre una profondità di interlacciamemto di almeno 70 ms per i servizi a rate più elevati, con l'opzione di poter estendere tale valore senza necessità di incrementare la memoria del ricevitore. Ciò consente di ottenere una maggiore immunità a disturbi di tipo impulsivo e può consentire una migliore ricezione in condizioni di mobilità a velocità elevate.
- Struttura di trama flessibile, in cui i dati possono essere dispersi sull'intera trama per avere la massima diversità temporale oppure concentrati in bursts per consentire il massimo risparmio energetico nel ricevitore. La struttura di trama prevede un'efficiente segnalazione di livello fisico per trasferire i parametri di trasmissione al ricevitore: il simbolo P1 serve per sincronizzazione di trama e per rivelazione rapida del segnale DVB-T2; i simboli P2 trasportano dati che descrivono la struttura della trama (segnalazione L1) e informazioni di tipo PSI/SI
- Ampliamento dei possibili segnali per la sincronizzazione e la stima del canale radio (segnali pilota di tipo scattered e di tipo continuo) che possono essere scelti sulla base del particolare ambiente trasmissivo (8 possibili configurazioni di dispersione di celle pilota).
- Possibilità di trasmissione con antenne multiple, basata sulla tecnica di Alamouti, che consente di migliorare la ricezione di segnali di pari livello provenienti da due trasmettitori.
- Meccanismi (due distinti, basati l'uno sulla tecnica "tone reservation" e l'altro sulla "constellation distortion") per ridurre il rapporto tra potenza di picco e potenza media del segnale trasmesso (PAPR).
- Segnalazione (a basso livello di potenza) per l'identificazione del trasmettitore.
- Meccanismi per permettere in futuro l'introduzione nel sistema di ulteriori tecniche preservandone la compatibilità all'indietro: TFS e FEF.

Nella figura 4 è illustrato il diagramma a blocchi del sistema di trasmissione DVB-T2 a cui si farà riferimento nella seguente trattazione delle specifiche funzionalità.

5. Il modello architetturale

Il sistema DVB-T2 si può logicamente dividere in tre sottosistemi (SS1, SS2, SS3) dal lato trasmissione e due sottosistemi (SS4 ed SS5) dal lato ricezione. Per quanto concerne le interfacce, se ne possono identificare due lato trasmissione (Interfaccia A – TS ed Interfaccia B – T2S) ed una (interna) lato ricezione. L'interfaccia su cui transitano segnali a radiofrequenza (Interfaccia C – DVB-T2) è quella tra il lato trasmissione e quello ricezione.

Sul lato trasmissione i sottosistemi sono:

Sottosistema SS1:
Multiplex statistico (generatore di TS)

Il sottosistema comprende la generazione di TS MPEG-2 e/o di GSE, § 6 (in figura 5 e figura 6 viene

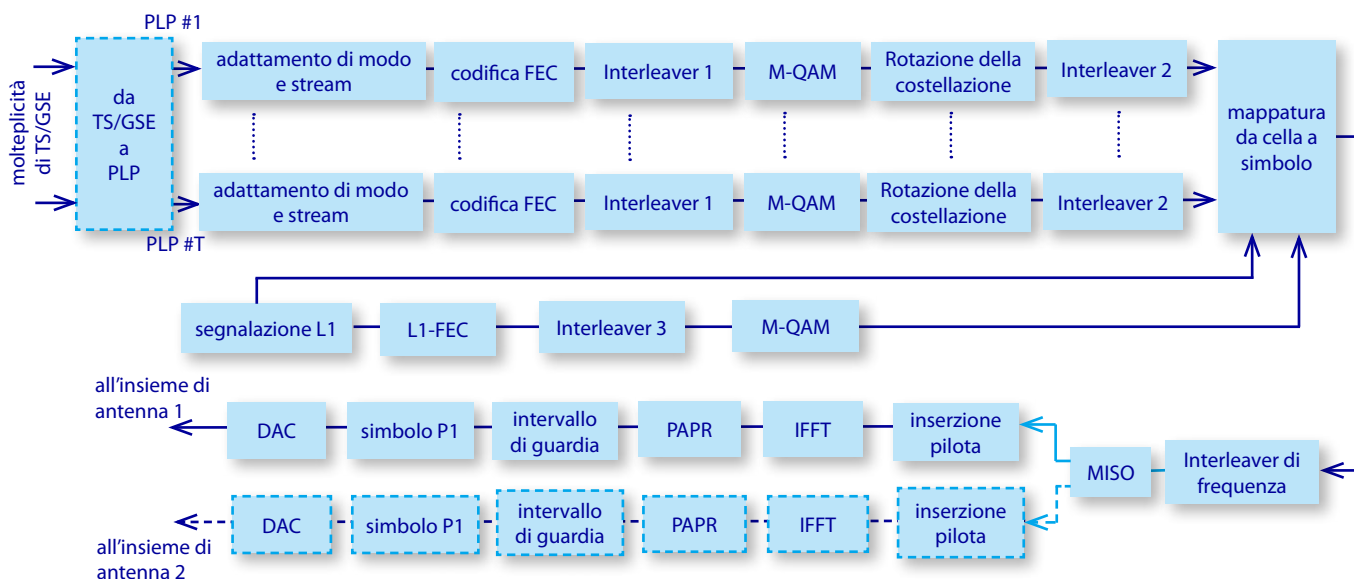



Fig. 4 - Diagramma a blocchi del sistema trasmittente DVB-T2.

illustrato il caso di TS). Per i servizi televisivi il sottosistema comprende la codifica audio/video, la generazione della segnalazione associata PSI/SI ed il resto della segnalazione di livello 2. Tipicamente i codificatori video ed audio producono un bitrate variabile che è controllato dal multiplex statistico in modo che l'aggregazione di tutti i servizi (a loro volta composti da stream elementari audio, video e dati) produca un flusso in uscita a bitrate costante (escludendo i pacchetti NULL). Il sottosistema SS1 si interfaccia a quello SS2 attraverso l'interfaccia A – TS (tipicamente TS MPEG-2 su interfaccia fisica ASI).

Sottosistema SS2: Gateway DVB-T2

Il cosiddetto "Gateway DVB-T2" (sottosistema SS2) è un blocco funzionale opzionale che viene impiegato quando sia previsto l'impiego di più PLP distinti (§ 9.1). In caso contrario il Blocco SS3 è connesso direttamente all'SS1 ed il sistema si presenta funzionalmente analogo al DVB-T, con la differenza, però delle opzioni avanzate di FEC e modulazione.

Il Gateway DVB-T2 produce all'interfaccia d'uscita (T2S) una sequenza di trame T2S, ciascuna delle quali contenente un numero intero di trame in banda base (BBFRAME) (§ 7) con la segnalazione richiesta (ovvero: tipo di costellazione, parametri di FEC e profondità dell'interleaving temporale) per creare una trama di livello fisico (PL-frame) nel modulatore DVB-T2 e trasmetterla con la tempistica necessaria per la sincronizzazione in una rete SFN. A questo scopo il sottosistema SS2 interfaccia quello SS3 attraverso l'interfaccia B-T2S.

Il sottosistema comprende funzionalità per il DVB-T2 quali "Mode adaptation" e "Stream adaptation", ma può comprendere anche funzionalità di remultiplexing quali il ricampionamento dei PCR definiti nel TS.

Sottosistema SS3: Modulatore DVB-T2

Il sottosistema può venire connesso a monte con due modalità:

- direttamente ad SS1 attraverso l'interfaccia A
- ad SS2 (come indicato in figura 6 e figura 7) attraverso l'interfaccia B

Nel primo caso il modulatore incorpora tutte le funzioni descritte nel livello fisico del DVB-T2; nel secondo caso (uso del flusso T2S) alcune funzionalità sono spostate nell'SS2 ed al modulatore DVB-T2 compete solamente la creazione del segnale a radiofrequenza

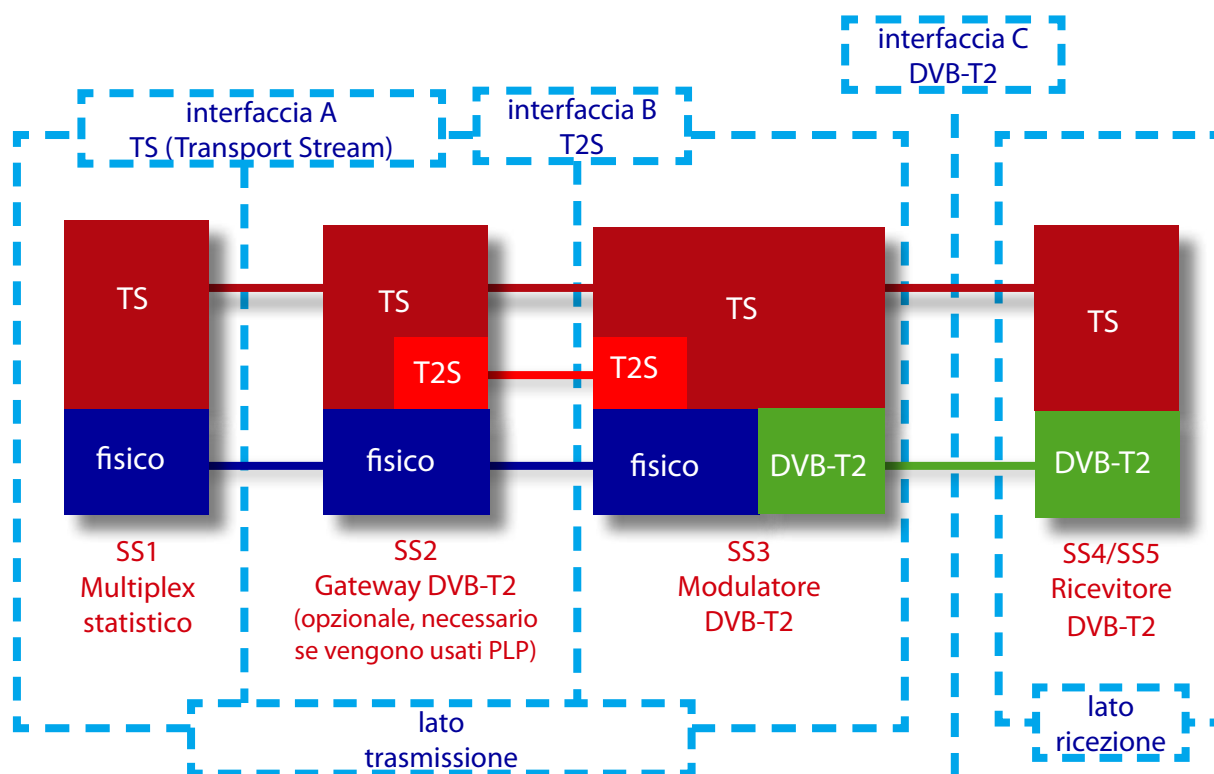



Fig. 5 - Stack dei Procolli nell'architettura di riferimento del DVB-T2 (nel caso di flusso in banda base di tipo MPEG-2-TS).

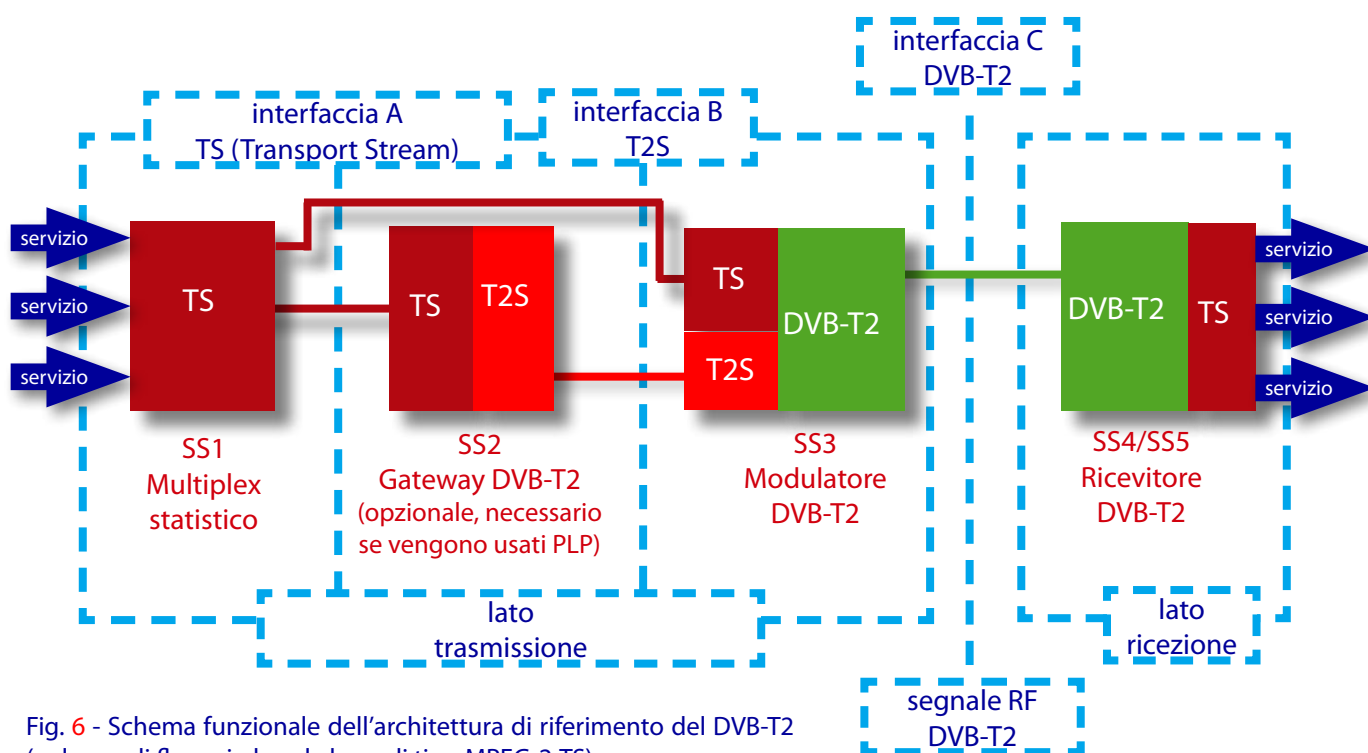



Fig. 6 - Schema funzionale dell'architettura di riferimento del DVB-T2 (nel caso di flusso in banda base di tipo MPEG-2-TS).

con la struttura di trama già determinata da SS2. Il flusso T2S infatti trasporta le trame in banda base e la relativa segnalazione. Il sottosistema SS3 interfaccia quello SS4 attraverso l'interfaccia C-DVB-T2 (il segnale DVB-T2 trasmesso a RF).

Sul lato ricezione i sottosistemi sono:

Sottosistema SS4: Demodulatore DVB-T2

Il sottosistema riceve un segnale a radiofrequenza (o più nel caso SFN) e produce in uscita uno stream di servizio ed uno stream di segnalazione. Il sottosistema SS4 interfaccia quello SS5 attraverso l'interfaccia D (non illustrata in figura 5 e figura 6, in quanto "interna"). Quando non viene usato SS2, gli stream che passano sull'interfaccia B sono identici a quelli che passano sull'interfaccia D.

Sottosistema SS5: Stream decoder

Il sottosistema riceve uno stream di servizio ed uno stream di segnalazione, produce in uscita i servizi (composti da audio, video e dati).

Altre caratteristiche:

Distribuzione delle trame T2S ai trasmettitori

Per assicurarsi che modulatori multipli (ognuno con un trasmettitore separato) in una rete a singola frequenza (SFN) generino trasmissioni identiche, è necessario che i contributi ai modulatori siano generati centralmente e distribuiti attraverso l'interfaccia T2S.

Come si e visto, il modulo SS2 "Gateway DVB-T2" genera il flusso T2S ricevendo in ingresso il tradizionale TS MPEG2.

Un vantaggio nell'uso delle trame T2S è quindi quello di poterle distribuire (tramite IP e/o satellite) a vari trasmettitori, ciascuno dei quali è messo in grado di generare, sulla base delle istruzione contenute nel T2S, un flusso di trame di livello fisico (PL-frame) DVB-T2 identico a quello generato dagli altri e di trasmetterlo in maniera sincrona in una SFN.

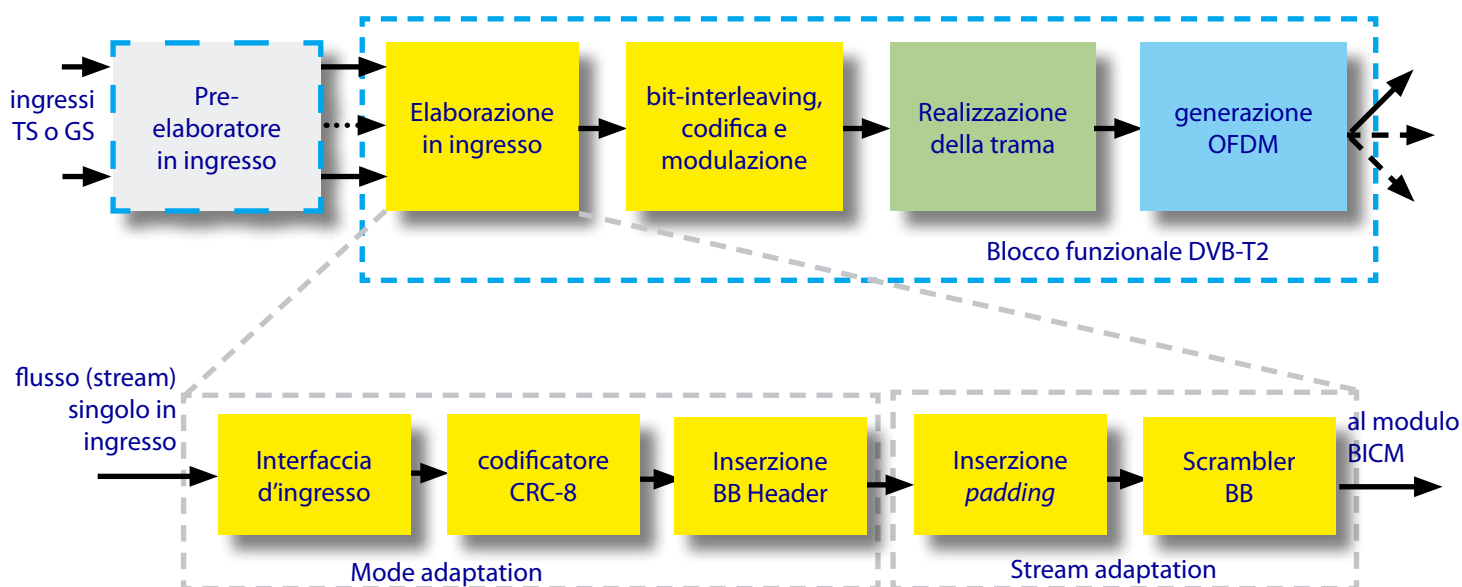



Fig. 7 - Diagramma a blocchi del blocco funzionale "DVB-T2" del Sottosistema SS3: Modulatore DVB-T2; con espansione del modulo "Input Processing" nel caso di singolo PLP (input mode "A").

Inserzione di servizi locali

L'uso del T2S consente l'inserzione di servizi a diffusione locale in un flusso di contribuzione (T2S) distribuito a livello nazionale.

L'inserzione è possibile predisponendo delle trame fittizie in banda base (*dummy frames*) che riservino una banda prefissata nel flusso T2S distribuito. L'inserzione avviene semplicemente sostituendo le trame fittizie con le trame che veicolano i contenuti locali. Ovviamente tale possibilità si riferisce esclusivamente alla contribuzione in reti MFN i cui siti possono introdurre servizi locali modificando opportunamente il segnale da diffondere. Ciò risulta impraticabile nel caso di reti SFN in quanto in tal caso, per definizione, il segnale digitale diffuso dai diversi siti deve essere identico.

Nella figura 7 viene illustrato il blocco funzionale "DVB-T2" del Sottosistema SS3: Modulatore DVB-T2

6. Flussi dati in ingresso

Come nello standard DVB-S2 [2] il sistema è progettato per adattarsi a qualunque formato dei flussi di dati in ingresso, primi tra tutti i "tradizionali" flussi MPEG TS, singoli o multipli, ma anche IP e ATM, attraverso flussi generici GSE singoli o multipli, a pacchetti o continui. Questo fa si che l'eventuale futura definizione di altri formati, possa essere recepita senza modifiche al sistema. Inoltre l'architettura del DVB-T2 non pone nessun vincolo alla possibilità che ciascun PLP trasporti un flusso di tipo TS o GSE.

Per trasportare differenti servizi con differenti gradi di protezione, in un unico canale fisico, il DVB-T2 definisce i PLP. Il trasmettitore DVB-T2 elabora PLP multipli in modo tale che il ricevitore possa decodificare i singoli PLP di interesse ed eventualmente il "common PLP", un PLP speciale, che il ricevitore può sempre decodificare, definito nello standard DVB-T2 (Annex D di [4]) per trasportare una sola volta i pacchetti comuni ai vari TS. Questo è il caso di informazioni come ad esempio l'EIT: i pacchetti dati relativi possono essere rimossi dai differenti TS ed inseriti nel common PLP. Il ricevitore sarà poi in grado di effettuare la ricostruzione di un valido TS prelevando dati dal common PLP e dal PLP del servizio di interesse.

Il blocco "da TS/GSE a PLP" in figura 4 opera la funzione, completamente deterministica, di *separare/ricongiungere* i pacchetti e assicura la sincronizzazione tra il contenuto dei PLP dei servizi ed il *common* PLP. Tale meccanismo pur mantenendo una completa trasparenza *end-to-end* del sistema, ne migliora significativamente l'efficienza.

7. Framing di Banda Base e protezione dell'informazione

Nell'ottica di garantire un elevato grado di compatibilità con lo standard satellitare DVB-S2, lo standard DVB-T2 ha previsto, pur con opportune estensioni per migliorarne l'efficienza, meccanismi compatibili con quelli già definiti nello standard DVB-S2 sia per l'elaborazione dei dati in ingresso, sia per le tecniche di correzione d'errore (FEC).

In particolare, si tratta rispettivamente di:

- impacchettamento dei flussi in ingresso in trame di banda base. Con questa tecnica i dati vengono allineati a formare delle trame di banda-base (BBFRAME), eventualmente previo completamento con bit di riempimento. Si opera inoltre una prima operazione di scrambling che distribuisce uniformemente i simboli binari nel BBFRAME, evitando la presenza di sequenze critiche per la successiva codifica FEC. Questa struttura e la relativa intestazione sono le medesime del sistema DVB-S2 e sono generate con lo stesso meccanismo di soppressione dei pacchetti nulli e sincronizzazione del flusso. Si ricorda che, come detto in precedenza, una trama T2 contiene un numero intero di BBFRAME e la relativa segnalazione (ovvero: tipo di costellazione, parametri di FEC e profondità dell'interleaving temporale).
- Inserimento dell'header del BBFRAME, che trasporta informazioni sull'adattamento dei pacchetti esterni (es: TS) ai formati interni DVB, ed è compatibile con i protocolli MPEG-TS e

GSE (adattamento diretto IP su DVB). Sono definiti 2 tipi di BB-header: l'uno, NORMAL mode, compatibile con quello definito dallo standard DVB-S2; l'altro nuovo, HIGH-EFFICIENCY mode, che riduce l'overhead dell' 1%.

- Utilizzo dello stesso schema di codifica del sistema DVB-S2
- Introduzione di un meccanismo di cancellazione e re-inserimento dei Null-Packets del TS e di "synchronisation & jitter removal" basato su "time-stamp" ereditato dal DVB-S2 (sviluppato dal Centro Ricerche Rai)

Nella figura 8 è riportata la struttura di una BBFRAME, che rappresenta l'unità dati elementare sottoposta a FEC di tipo LDPC/BCH.

La trama denominata "FEC frame", strutturata come riportato in figura 8, è l'unità dati fondamentale. La sua lunghezza è fissa ed è generalmente pari 64800 bit; tuttavia è anche prevista, in alternativa, una lunghezza di 16200 bit (comeper il DVB-S2), che rende possibili applicazioni a bassi bit-rate con latenza ridotta. Le prestazioni dei codici corti (FEC frame=16200 bit) risultano qualche decimo di dB peggiori di quelle dei codici lunghi (FEC frame=64800 bit)

Così come per il DVB-S2, il codice FEC del DVB-T2 è basato sulla concatenazione tra codici LDPC [10] e BCH, tecnica che fornisce prestazioni eccellenti non solo su canali satellitari ma anche in ambiente terrestre.

$$B = \left| \begin{array}{l} 1\,0\,0\,0 \ldots 0\,0\,0 \\ 1\,1\,0\,0 \ldots 0\,0\,0 \\ 0\,1\,1\,0 \ldots 0\,0\,0 \\ 0\,0\,1\,1 \ldots 0\,0\,0 \\ \ldots \\ 0\,0\,0\,0 \ldots 1\,1\,0 \\ 0\,0\,0\,0 \ldots 0\,1\,1 \end{array} \right|$$

Fig. 9 - Matrice bidiagonale inferiore ad elementi unitari.

Per ridurre la complessità di codifica, i codici LDPC adottati dal DVB-T2 sono caratterizzati da "matrici di parità" della forma $H_{(N-K)\times N} = A_{(N-K)\times K}\ B_{(N-K)\times(N-K)}$, in cui A è una matrice sparsa (ossia a basso contenuto di "1") ciclica (ciò permette di ridurre la quantità di informazione da memorizzare per caratterizzarla) e B è una matrice bidiagonale inferiore ad elementi unitari, così come illustrata in figura 9.

I rapporti di codifica FEC del codice LDPC ammessi sono un sottoinsieme di quelli del DVB-S2: 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6, per la protezione dei PLP, e ¼, con FEC frame corto, per la protezione dei simboli P2. Si osserva che i valori del tasso di codifica riportati sono nominali, e che nel caso di impiego di codici corti i valori effettivi possono essere leggermente più bassi.

Come previsto dal DVB-S2, per evitare possibili errori residui, dopo la decodifica LDPC, le parole di codice sono ulteriormente protette da un FEC di tipo BCH, di dimensione ridotta, applicati a monte della codifica LDPC.

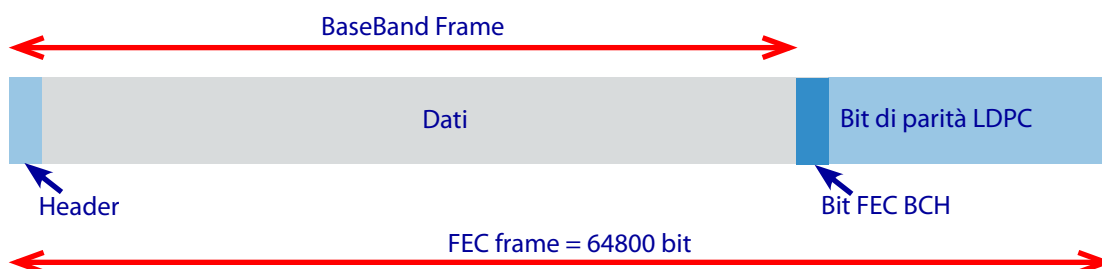



Fig. 8 - Trama di banda base e codifica FEC.

I codici LDPC utilizzati da DVB-T2 sono di tipo irregolare, nel senso che il livello di protezione di ciascun bit del codice non è uniforme, ma dipende dal peso della relativa colonna della matrice di parità. Anche le costellazioni QAM multilivello dello standard DVB-T2 sono caratterizzate da una protezione non uniforme dei bit. Per poter ottimizzare la corrispondenza tra i bit della parola di codice e i bit del punto della costellazione, è stato inserito un interleaving di bit tra il FEC e il mapper (blocco che associa i bit ai punti sulle costellazioni).

8. Tecniche di modulazione

8.1 Modulazione OFDM

La tecnica definita dal DVB-T2 riprende quella già utilizzata dallo standard DVB-T (ed anche da altri standard di diffusione a radiofrequenza, quali DAB, ISDB-T, DRM ed altri): la modulazione OFDM [11,12] con intervallo di guardia.

Nella modulazione OFDM ogni simbolo trasporta dati su un numero molto elevato di portanti distinte, e l'intervallo di guardia, ripetizione ciclica della porzione utile di simbolo, "assorbe" l'interferenza intersimbolica generata dagli echi di propagazione, tipici della ricezione in ambiente terrestre.

Per il soddisfacimento dei requisiti di carattere commerciale, i parametri che definiscono la modulazione OFDM sono stati opportunamente estesi rispetto al DVB-T. Si descriveranno nel seguito le principali innovazioni introdotte.

8.1.1 Numero delle portanti

Sono 6 le possibili configurazioni del numero di punti su cui viene effettuata la FFT nel modulatore per il DVB-T2: 1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K. Maggiore è il numero di portanti (a parità di larghezza di banda complessiva), minore è la spaziatura tra di esse e maggiore è la durata del periodo di simbolo (circa 1 ms per 8K;....; 4 ms per 32K). Ciò rende il sistema più critico in presenza di interferenze di tipo inter-carrier, e di effetto Doppler (è quindi una modalità che mal si adatta alla ricezione su mezzi mobili). Ma riduce anche la durata relativa dell'intervallo di guardia rispetto al periodo di simbolo in trasmissione, pur mantenendo costante la sua durata assoluta (vedi figura 10), il che può comportare da un lato una riduzione dell'overhead dell'intervallo di guardia per una data distanza reciproca dei siti in SFN, dall'altro un incremento della distanza dei siti SFN per un data percentuale dell'intervallo di guardia rispetto alla lunghezza del simbolo. Ulteriori vantaggi di operare con FFT di dimensioni elevate sono: maggiore robustezza nei confronti del rumore impulsivo; inferiori livelli di densità di potenza fuori banda; opzione di interpolare in frequenza solo tra le configurazioni pilota (a causa della vicinanza delle portanti). Da notare che gli studi attuali sembrano indicare che il rumore di fase sia controllabile anche per il 32K.

Nel DVB-T2 i modi 16K e 32K sono proposti per le configurazioni di rete SFN. Il valore di 1K è invece utilizzabile per trasmissioni in condizioni di elevata variabilità temporale e in canalizzazioni ridotte (es.: 1,7 MHz). Anche i simboli P1 che identificano l'inizio di una trama fisica, utilizzano la modalità 1K.

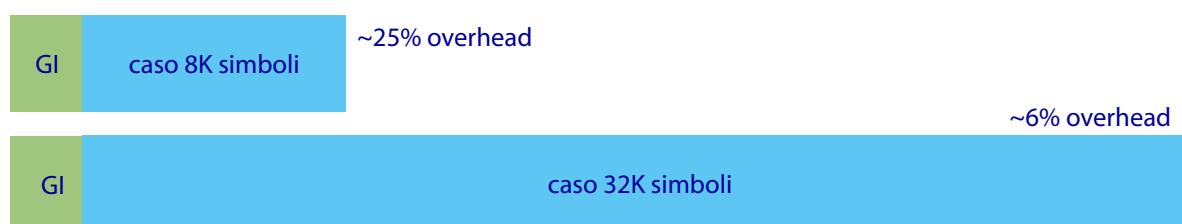



Fig. 10 - Rappresentazione della durata del simbolo nel caso di 8K e 32K portanti. In entrambi i casi l'intervallo di guardia è circa 224 μs e consente la realizzazione di SFN con distanza tra i trasmettitori di circa 70 km.

8.1.2 Dimensioni degli intervalli di guardia

Le possibili frazioni che definiscono gli intervalli di guardia sono state estese, rispetto al DVB-T, con particolare attenzione verso valori più bassi (in corrispondenza con l'estensione verso livelli più elevati di FFT), per consentire una riduzione di overhead e una maggiore flessibilità. Possono assumere i seguenti valori: 1/128, 1/64, 1/32, 1/16, 19/256, 1/8, 19/128, 1/4.

8.1.3 Costellazioni

Per quanto riguarda le costellazioni di modulazione utilizzabili, lo standard DVB-T2 aggiunge a quanto previsto nella specifica DVB-T (QPSK, 16-QAM, 64-QAM), la tecnica 256-QAM (figura 11) che permette il trasferimento di 8 bit per simbolo. Ciò è reso possibile dalla maggiore efficienza della codifica FEC basata sui codici LDPC utilizzati dal DVB-T2 rispetto a quelli adottati per il DVB-T: tale efficienza garantisce la possibilità di operare come se i rapporti segnale/rumore fossero maggiori di quelli effettivi.

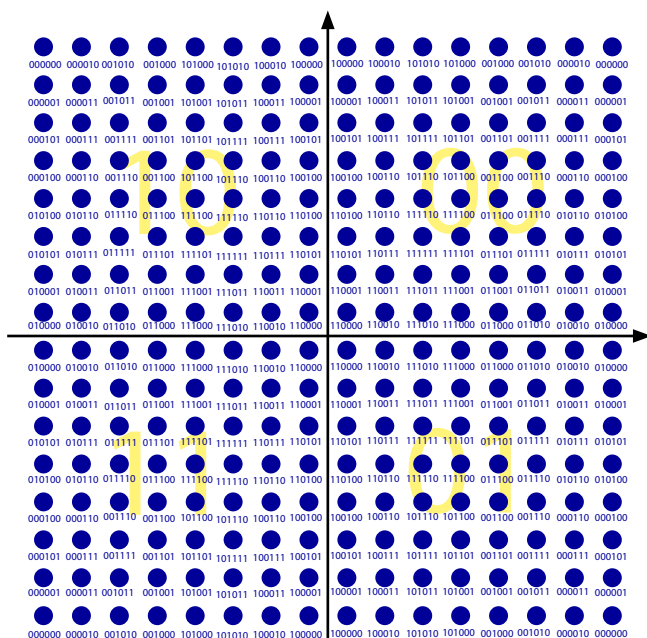



Fig. 11 - Costellazione 256-QAM. Ad ogni simbolo sono associati 8 bit, di cui i due più significativi identificano il quadrante di appartenenza.

Se ciò non fosse, infatti, essendo la distanza euclidea tra punti adiacenti della costellazione 256-QAM, circa la metà di quella dei punti della 64-QAM, la più elevata sensibilità al rumore della prima dovrebbe essere compensata con un corrispondente aumento del rapporto segnale/rumore.

8.2 Costellazioni ruotate

Il codice LDPC del DVB-T2 permette di operare con configurazioni a più alto rapporto di codifica rispetto al DVB-T - e quindi a più alta efficienza spettrale - a patto che il canale radio non sia affetto da profonde attenuazioni selettive in frequenza.

In tale caso, infatti, indipendentemente dal tipo di FEC utilizzato, per ottenere prestazioni adeguate può essere necessario aumentare la ridondanza del FEC, riducendo così la capacità trasmissiva. Per ovviare a tale inconveniente, e poter utilizzare i codici LDPC ad alto tasso di codifica anche in presenza di canali selettivi in frequenza, lo standard DVB-T2 prevede una nuova tecnica, alternativa alla ridondanza di codifica: le cosiddette costellazioni ruotate.

Nelle costellazioni tradizionali, le coordinate dei differenti punti sono allineate orizzontalmente (per ordinata) o verticalmente (per ascissa). Ne risultano più punti aventi o la stessa ascissa o la medesima ordinata. La distinzione tra due di questi punti è possibile solo con entrambe le coordinate, non essendoci correlazione tra i due assi. Con la tecnica di rotazione, la costellazione prescelta è ruotata nel piano complesso "I-Q" in modo tale che non esistano più punti con una coordinata uguale. Ciascuna coordinata del sistema ruotato è quindi sufficiente per riconoscere il punto della costellazione e le doppie coordinate (ascissa ed ordinata di ciascun punto) risultano quindi ridondanti.

Ad esempio per un sistema 16 QAM i punti della costellazione dopo rotazione assumono per ascissa ed ordinata 16 valori distinti (figura 12b).

Di per se questa tecnica non dà vantaggi, ma grazie all'introduzione di un ritardo ciclico per l'ordinata Q prima dell'interleaving in tempo e frequenza (figura 12a), ascissa ed ordinata di ciascun punto sono trasferite su differenti celle OFDM. Dopo la

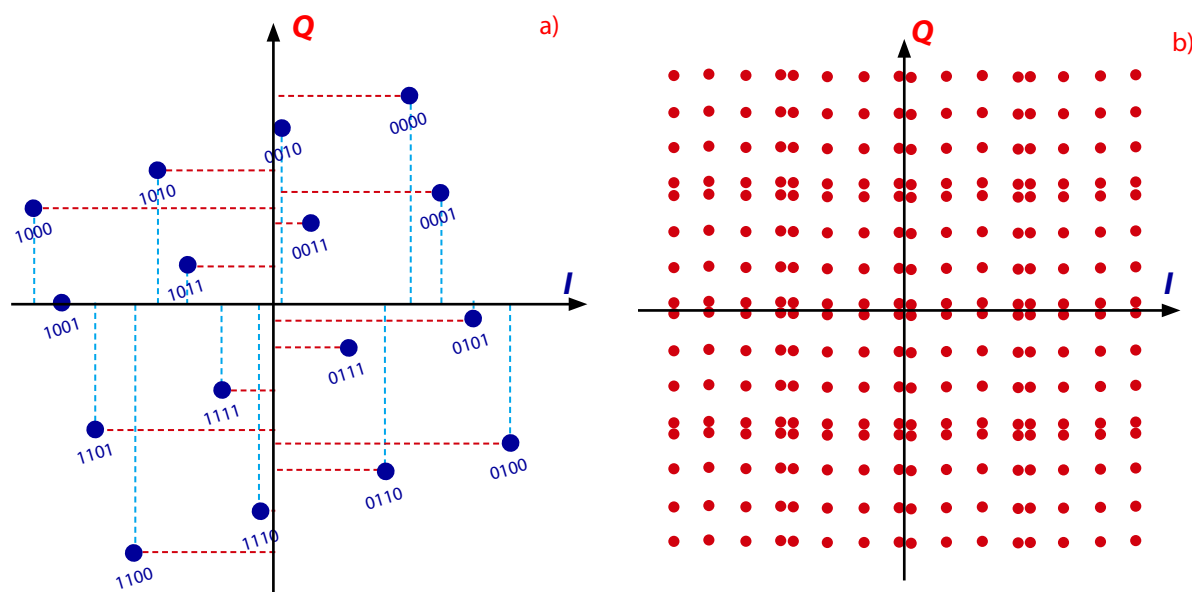



Fig. 12 - a) Costellazione 16 QAM ruotata, prima del ritardo ciclico di Q.
b) Costellazione 16 QAM ruotata, dopo il ritardo ciclico di Q. Vi sono $16^2 = 256$ stati possibili.

riunificazione dei valori di I e Q a valle del de-interleaving al ricevitore, se una delle due coordinate è compromessa per effetto dei disturbi selettivi sul canale radio, l'altra coordinata, se ricevuta correttamente, è in grado, da sola, di consentire una decodifica univoca del simbolo trasmesso.

Tale tecnica non degrada le prestazioni su canale Gaussiano, mentre fornisce, in canali affetti da fading, un guadagno che può raggiungere anche valori molto elevati nel caso di canali molto critici (ad esempio echi a 0 dB, nel caso di SFN o nel caso di canali con cancellazione, in presenza di interferenze impulsive in frequenza). Ovviamente tale guadagno si traduce nella possibilità di utilizzare codici correttori FEC con tassi di codifica più elevati e quindi in capacità trasmissive maggiori.

8.3 Larghezza di banda estesa

Si tratta di una modalità di funzionamento che permette un uso ottimale della banda del canale di trasmissione nel caso di impiego di FFT di ordine più elevato (16K e 32K). Infatti, in tal caso lo spettro del segnale ai bordi della banda occupata decade molto più rapidamente rispetto al caso di FFT di ordine più basso, come illustrato in figura 13. Conseguentemente, pur mantenendo la stessa spaziatura tra le portanti di quella che si ha nel modo di funzionamento normale è possibile aggiungere un certo numero di portanti addizionali ad entrambe le estremità dello spettro, ottenendo così un guadagno in efficienza di circa il 2%.

9. Scheduling dei dati

9.1 Physical Layer Pipes

La configurazione più semplice di applicazione dello standard DVB-T2 è costituita da un unico PLP su un unico canale a radiofrequenza. Questa modalità operativa, che si presuppone sia quella delle prime implementazioni dello standard, si configura come una estensione diretta dello standard DVB-T. Tuttavia, come già accennato precedentemente, lo standard prevede modalità operative più complesse. In particolare, lo strato fisico dello standard DVB-T2

permette una codifica personalizzata (in termini di Modulazione / FEC / Interleaving) per ciascun servizio o gruppi di servizi. Ciò avviene attraverso l'uso di un certo numero (fino ad un massimo di 256) di PLP, cioè flussi di livello fisico distinti, ciascuno operante in maniera indipendente l'adattamento di modo (Mode Adaptation), FEC, mappatura di bit nelle costellazioni (celle) e interleaving temporale. Con ciò il sistema è in grado di differenziare la robustezza fornita a ciascun servizio ed ottimizzare i requisiti di memoria per l'interleaving temporale, sulla base dei requisiti di banda del servizio trasportato e della tipologia del terminale ricevente e dall'ambiente operativo dello stesso: fisso, trasportabile, ed eventualmente mobile.

Ciascun PLP è costituito da "slice" che si ripetono ciclicamente in una struttura di trame tempo-frequenza come riportato in figura 14. Gli elementi funzionali denominati "scheduler"/"frame builder" operano la corrispondenza tra i dati all'uscita dell'interleaving temporale e i simboli OFDM ed aggiungono l'opportuna segnalazione per generare trame e super-trame DVB-T2 (che saranno definiti in § 9.2).

a)

frequenza [MHz], relativa alla frequenza centrale

Fig. 13 - Modalità con estensione di banda
a) Spettro teorico del segnale DVB-T2 (Canale a 8 MHz; intervallo di guardia 1/8; modalità a portante estesa per 8K, 16K e32K)
b) Dettaglio dello spettro nelle medesime condizioni.

La figura 14 riporta un esempio semplificato di come celle provenienti da differenti PLP (ognuna identificata da un colore distinto) possono essere lette dalla memoria dell'interleaving temporale e allocate nei simboli OFDM (blocchi verticali).

La flessibilità della strategia di mappatura delle celle nel tempo e nella frequenza consente la sua ottimizzazione nelle più diverse situazioni. Per ottenere la massima diversità temporale (ad esempio per aumentare la robustezza con rumore impulsivo) si possono distribuire le celle di un PLP su tutti i simboli OFDM di una trama (od anche di più trame): a tal fine la memoria dell'interleaving temporale di un dato PLP è suddivisa in più sub-slice (come nei motori MultiJet![Nota 2]), che sono mappate nei simboli OFDM alternandosi con le sub-slice di altri PLP. Ciò implica che per ricevere il servizio in questione il ricevitore deve operare con continuità per tutti i simboli della trama.

Nota 2 - Nei motori MultiJet è possibile operare un controllo molto fine sul tempo e la quantità di combustibile iniettato, migliorando così l'efficienza. Analogamente qui si può decidere di trasmettere i dati relativi ad un servizio consecutivamente oppure suddividerli in più sub-slice di durata temporale minore e trasmetterli (iniettarli) a frequenza maggiore: un rumore impulsivo corrompe solo parte dell'informazione, facilitando così le procedure di correzione degli errori.

b)

frequenza [MHz]
relativa alla frequenza centrale

Fig. 14 - Struttura tempo-frequenza dei PLP;
viene evidenziata la ripetizione ciclica dei blocchi tempo-frequenza.

Invece per ottenere il massimo risparmio energetico (ad esempio nel caso di dispositivi portatili dotati di batterie), si possono concentrare temporalmente le celle di un PLP su simboli OFDM adiacenti, senza prevedere sub-slice, come mostrato in figura 14, e attivare il ricevitore solo per una ridotta percentuale di tempo, durante la trasmissione dei simboli che convogliano l'informazione (PLP) richiesta. Si noti che la figura è riferita al caso in cui la velocità di trasferimento di ciascun PLP è costante. Se ciò non fosse, le dimensioni delle slice sarebbero diverse da trama a trama.

I dati comuni a tutti i PLP sono trasportati nel cosiddetto "common PLP", situato all'inizio di ciascuna trama. Per decodificare un singolo servizio un ricevitore deve essere in grado di leggere contemporaneamente le informazioni relative ad almeno il common PLP ed il PLP che trasporta il servizio prescelto. Il common PLP trasporta le tabelle PSI/SI dei servizi, che convogliano, ad esempio, le informazioni per l'EPG dell'intero multiplex trasmesso.

Ovviamente in aggiunta a ciò deve essere prevista una segnalazione addizionale, per comunicare la modalità operativa utilizzata. A tal fine, le informazioni PSI/SI definite nel TS di MPEG-2 sono opportunamente estese per includere tre nuovi elementi informativi:

- T2PLP Information Table (T2PIT);
- T2 delivery system descriptor (T2dsd);
- T2 system identifier.

La T2PIT descrive la corrispondenza tra i servizi trasportati dal sistema DVB-T2 ai corrispondenti PLP. La principale ragione per la definizione di questa nuova tabella invece di un descrittore, è legata alla circostanza che l'informazione relativa è di tipo piuttosto statico e conseguentemente il relativo periodo con cui deve essere ripetuta risulta ridotto.

La definizione del T2dsd segue la stessa logica del corrispondente parametro del DVB-T.

9.2 Struttura delle trame

La struttura di trama DVB-T2 è riportata in figura 15

A livello più alto, la struttura consiste di super-trame (di durata massima pari a 64 s nel caso in cui non siano usate FEF, §11.4) che sono suddivise in trame e queste sono ulteriormente composte da simboli OFDM.

Il numero di trame per ogni super-trama è definito in modo che per ogni PLP di dati vi sia un numero intero di *Interleaving Frames* in ogni super-trama. La super-trama può anche includere FEF, che corrispondono ad intervalli temporali lasciati inutilizzati dal segnale DVB-T2 (consentendo la possibilità di introdurre in futuro servizi non attualmente definiti).

Le trame DVB-T2 iniziano con un simbolo di riferimento denominato P1 (§ 10.1), differente da un normale simbolo OFDM, seguito da uno o più simboli di riferimento P2 (§ 10.2), il cui scopo principale è trasferire la segnalazione. Infine segue un numero configurabile di simboli OFDM di dati. La durata delle trame può essere dell'ordine di 100÷250 ms.

Come già detto in precedenza la capacità di un PLP può variare nel tempo, conseguentemente la posizione in tempo e frequenza delle celle associate a un PLP può cambiare da trama a trama. I dati di un PLP possono non essere mappati su tutte le trame ma sono possibili salti di più trame.

Per poter estrarre i dati del PLP selezionato dall'utente e del "Common PLP" (quando presente), il ricevitore deve essere in grado di aggiornare dinamicamente la posizione delle celle di interesse.

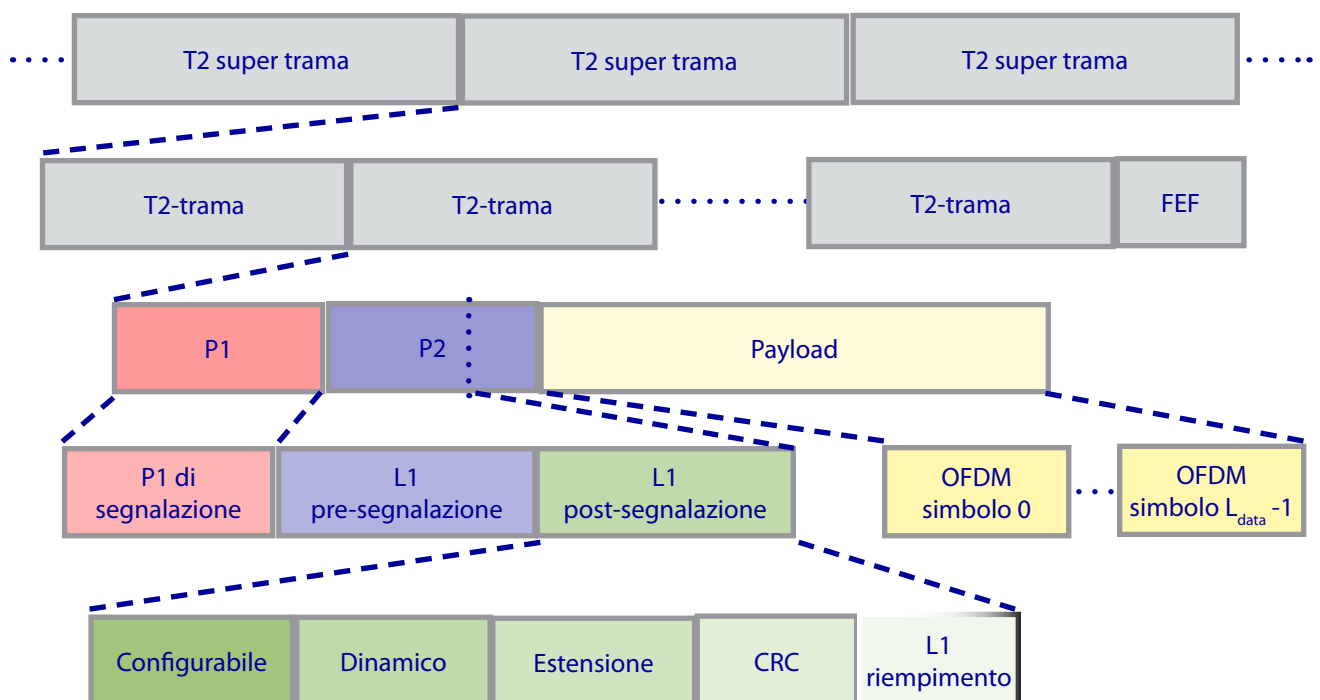



Fig. 15 - Struttura di trame e super-trame del DVB-T2.

Poiché il DVB-T2, anche in caso di ricezione statica, ma tanto più in quello di ricezione in mobilità, può essere soggetto a disturbi di tipo impulsivo, la segnalazione della posizione delle celle (le cosiddette informazioni L1 dinamiche) ha richiesto accorgimenti particolari (con meccanismi di correzione di errori e trasmissione ripetuta) per consentirne una trasmissione il più possibile robusta. Infatti la segnalazione L1 è trasferita in ogni trama nel simbolo P2, ma l'informazione relativa alla trama seguente può essere anche "embedded" nei dati trasferiti dal PLP. È anche possibile ripetere questa informazione, attraverso la segnalazione L1, con uno o due trame in anticipo.

9.3 Stadi di interleaving (bit, cella, tempo e frequenza)

I codici correttori d'errore operano generalmente bene solo per errori distribuiti in modo casuale (statisticamente indipendenti). Per evitare *pattern* d'errore che possono vanificare le potenzialità correttive del codice, bisogna garantire la distribuzione degli eventi errore su più blocchi di codice. Lo scopo dell'*interleaving* è quello di distribuire uniformemente i dati nel tempo ed in frequenza in modo che rumori di tipo impulsivo (disturbi del segnale OFDM per un breve periodo temporale) e *fading* selettivi in frequenza (disturbi su un piccolo intervallo di frequenze, come quelli che possono essere causati da interferenze PAL o da propagazione multicammino) non compromettano lunghe sequenze di dati originali contigui. In più bisogna tenere in conto che la codifica FEC non protegge tutti i bit in ugual misura e che i bit dei punti di una costellazione di modulazione non presentano uguale grado di robustezza.

Il DVB-T2 utilizza quattro stadi di *interleaving*: ***bit, cella, tempo e frequenza***.

L'***Interleaver di bit*** lavora all'interno del blocco FEC e, insieme con il demultiplexer, mescola i bit della parola codificata, tenendo conto che sia nel codice LDPC che nelle modulazioni QAM non tutti i bit sono protetti allo stesso modo. Una scelta oculata del bit interleaver, che evita interazioni indesiderate tra i bit trasportati dal simbolo di modulazione e la struttura del codice LDPC, permette di ottimizzare le prestazioni. La struttura adottata per il codice con *rate* 3/5 è stata sviluppata dal Centro Ricerche Rai.

L'***Interleaver di cella*** applica una permutazione pseudo-random alle celle all'interno di un blocco FEC, diversa per ogni blocco FEC. Questo permette di rompere la regolarità della struttura dell'interleaver di tempo, ed evita possibili interazioni con la struttura del codice LDPC. Per esempio, in presenza di canali molto critici, che causano cancellazioni del

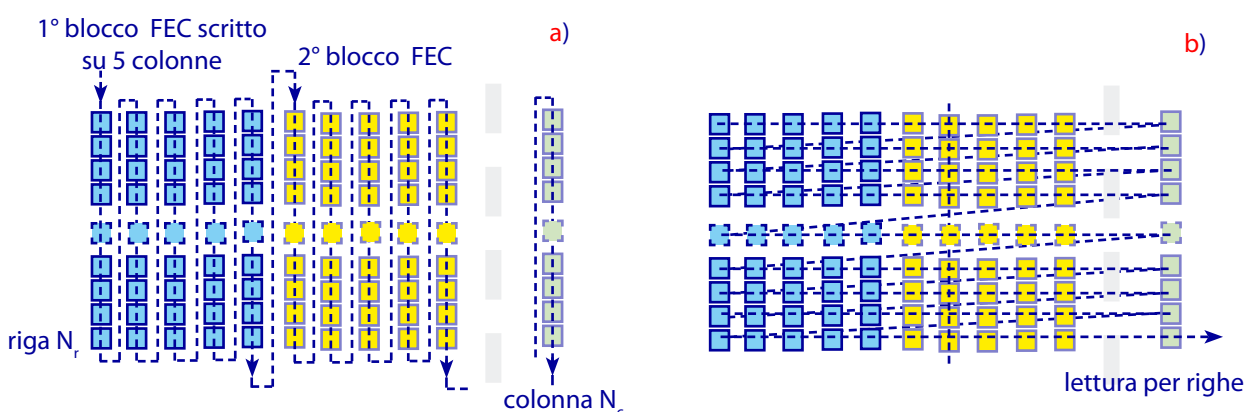



Fig. 16 - Interleaving temporale. L'interleaver intercala le celle costituenti un numero intero di blocchi FEC. I blocchi FEC sono scritti nella memoria organizzata come una matrice di N_c colonne N_r righe. Nell'esempio ogni blocco FEC è contenuto in 5 colonne ed N_r dipende dal tipo di modulazione usato e dalla lunghezza del blocco LDPC. Ad esempio, nel caso di 64-QAM ogni cella corrisponde a 6 bit, e, se il blocco LDPC è pari a 64800 bit, il numero di celle per ciascun blocco FEC assume il valore 10800 e N_r = 10800/5 = 2160. Il numero N_c è quindi pari al numero totale di blocchi FEC moltiplicato per 5. Una volta che tutti i blocchi FEC sono scritti per colonna (a), vengono letti per riga (b).

segnale, l'interleaver di cella fa si che esse si presentino in posizioni casuali all'interno della parola di codice, e non ci sia il rischi di presentazione con spaziatura regolare, in contrasto con la struttura del codice. L'interleaver di cella permette anche di aumentare la separazione tra le celle che portano la stessa informazione, nel caso di uso delle Costellazioni ruotate.

La maggiore innovazione introdotta dallo standard T2 rispetto al precedente T è l'***interleaving temporale*** (figura 16), con il compito di separare le celle appartenenti ad un blocco di codifica FEC su più simboli OFDM e potenzialmente su più trame. Questo permette di proteggere il segnale contro disturbi di tipo impulsivo, concentrati nel tempo (dovuti ad esempio al rumore impulsivo) e nel caso di canali tempo varianti. E' basato su un interleaver a blocco (righe-colonne) e per risparmiare memoria nel ricevitore, l'interleaver di tempo è applicato a livello di PLP. L'interleaver viene"caricato" per la durata di una trama (circa 200 ms), e si riempie più o meno a seconda del bit-rate istantaneo del PLP (numero intero di blocchi FEC): ritardo costante, indipendente dal bit-rate. La dimensione massima è di 500 Kcelle, equivalente a circa 10 Mbit nel ricevitore (soft-decision). Per un singolo PLP, la profondità di interleaving per un servizio HDTV è dell'ordine dei 60-70 ms (circa 10-20 simboli 32K-OFDM). Per servizi a basso bit-rate (es: TV mobile) trasportati da PLP multipli, la memoria disponibile permette una diversità temporale di molte trame.

Infine, per contrastare il fading selettivo in frequenza, così come il DVB-T, anche il DVB-T2 introduce l'***interleaver di frequenza***, con struttura a blocco a livello di simbolo OFDM e regola di interallacciamento di tipo pseudocasuale. La sua struttura pseudocasuale aiuta a rompere la regolarità dell'interleaver di tempo, e sparpaglia i dati associati alle portanti dei simboli OFDM in modo casuale. La regola di interallacciamento alterna tra due permutazioni, e ciò permette di aumentare la distribuzione dei PLP sulle varie portanti. Inoltre l'interleaver di frequenza mescola le celle appartenenti ai diversi PLP, trattate dagli altri interleaver indipendentemente, PLP per PLP.

10. Sincronizzazione e stima del canale

Il segnale DVB-T2 è progettato in modo tale da facilitare la sincronizzazione dei ricevitori in tempo e frequenza. Ciascuna trama è suddivisa in ***preambolo*** e ***payload***, così come riportato graficamente in figura 15.

Il ***preambolo*** è costituito da un simbolo denominato P1 e da un certo numero di simboli P2, dipendente dalla dimensione della FFT utilizzata: per sistemi con 32K e 16K vi è solamente un simbolo P2; per sistemi 8K, 4K, 2K e 1K sono presenti rispettivamente 2, 4, 8 e 16 simboli P2.

Segue il ***payload*** vero e proprio, (anche se alcuni dati possono essere già trasportati da simboli P2) che consiste di simboli OFDM le cui sottoportanti possono essere modulate da simboli di dati o da simboli pilota predefiniti.

In linea di principio, una struttura di trama come quella riportata in figura 15 non è strettamente necessaria in ambiente di trasmissione broadcast continua. Il precedente standard DVB-T, infatti, non prevede nessun preambolo nelle relative trame. Tuttavia l'uso del preambolo consente di ottimizzare le operazioni di sincronizzazione e di ampliare la possibile scelta dei parametri trasmissivi senza che ciò influenzi il tempo necessario alla sincronizzazione. Inoltre ciò non attacca la capacità trasmissiva del sistema: per una durata tipica del frame di 150-200 ms, l'overhead complessivo dovuto ai simboli P1 e P2 è inferiore all'1%.

10.1 Il simbolo P1

Il simbolo P1 è costituito da un simbolo OFDM su 1K portanti e da una particolare struttura di replicazione nel tempo, come illustrato in figura 17. La sezione indicata con C è la versione traslata in frequenza dei primi 542 campioni del simbolo OFDM che costituisce la sezione indicata con A. La sezione B è invece la versione traslata in frequenza degli ultimi 482 campioni della parte A. La traslazione in frequenza risulta pari alla spaziatura delle sottoportanti del simbolo OFDM. Solo 384 delle 1024

portanti sono modulate, secondo la modulazione differenziale DBPSK, e trasportano 7 bit di segnalazione, che indicano la modalità di trasmissione, la configurazione SISO/MISO e la dimensione dell'FFT. La struttura prefissata del simbolo P1, con le limitate informazioni di segnalazione trasferite in modalità estremamente robusta, consente al ricevitore di effettuare una scansione veloce delle frequenze trasmissive.

Fig. 17 - Formato e rappresentazione in frequenza del simbolo P1.

La rivelazione del simbolo P1 può essere utilizzata dal ricevitore come primo riferimento in tempo e frequenza. Il ricevitore può pertanto rilevare la presenza di una trasmissione DVB-T2 ed acquisire alcuni parametri chiave quali la dimensione della FFT o la presenza di Frame FEF. La particolare struttura C-A-B è stata definita per incrementare la capacità di rivelazione del simbolo P1 anche nei canali più critici come quelli con eco a 0 dB nei quali cioè gli echi risultano in opposizione di fase.

10.2 I simboli P2

I simboli P2 trasportano la segnalazione di livello 1 della trasmissione, L1, che, in presenza di PLP multipli, può essere quantitativamente rilevante, in quanto ciascuno di essi può possedere propri parametri di trasmissione.

La segnalazione L1 è organizzata in una parte di pre-segnalazione, contenente informazioni di tipo statico, costanti per tutta la durata del super-frame (ad esempio la dimensione dell'intervallo di guardia), ed una parte post-segnalazione, contenente informazioni di tipo dinamico. Possono poi essere aggiunte ulteriori informazioni riguardanti ad esempio dati comuni di tipo PSI/SI relativi ai servizi trasportati nel payload. La protezione della parte di pre-segnalazione è basata su un codice BCH seguito da codice LDPC punturato. La scelta del codice LDPC potrebbe sembrare insolita vista la ridotta lunghezza della parola di codice. Tuttavia la configurazione adottata garantisce prestazioni equivalenti a quelle ottenibili con un codice convoluzionale con lo stesso rate e evita la necessità di inserire un decodificatore Viterbi nel ricevitore, da usarsi solo per decodificare la segnalazione L1. La parte di post-segnalazione è protetta con lo stesso codice FEC dei dati.

I simboli P2 contengono anche le portanti pilota e permettono di iniziare la procedura di stima di canale, descritta nel prossimo capitolo.

Un esempio di struttura completa della trama dei simboli P2 è riportato in figura 18.

10.3 Configurazioni di segnali pilota

Anche lo standard DVB-T2, come il precedente DVB-T, prevede la dispersione in tempo e frequenza di portanti pilota "scattered" (SP) e continue (CP),

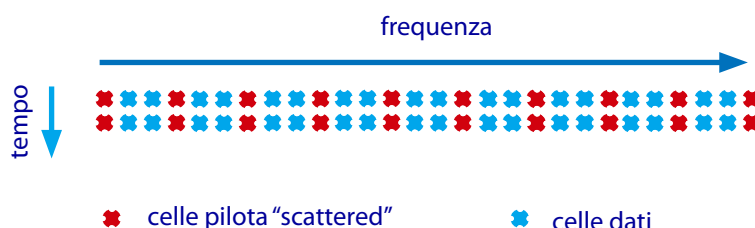



Fig. 18 - Simboli P2 nella modalità 8K; nella figura sono anche riportate le "celle pilota".

cioè di "celle dati OFDM" di prefissate ampiezza e fase trasmesse ad intervalli regolari per consentire al ricevitore di stimare le variazioni del canale trasmissivo ed effettuare le opportune compensazioni in tempo e frequenza. Le SP hanno come compito principale quello di permettere una stima affidabile del canale di trasmissione, e a differenza del DVB-T, che prevedeva una sola configurazione di portanti pilota "scattered" per tutti i valori di intervalli di guardia, nel DVB-T2 ne sono definite 8, con distanza tra le portanti circa uguale all'inverso della durata dell'intervallo di guardia.

Le CP invece sono utilizzate per il recupero "fine" di frequenza nel ricevitore e per la rimozione dell'errore di fase comune (CPE) sul simbolo OFDM. Come già per il DVB-T, la percentuale di CP dipende dalla dimensione della FFT:

- ~2.5% per 1K, 2K;
- ~0.7% per 8K, 16K, 32K.

Sia le SP che le CP sono trasmesse a potenza maggiorata (tre sono i possibili fattori di incremento della potenza, fino a 7 dB) in funzione della densità per ottimizzare il rapporto C/N della stima del canale.

Solo nel simbolo P2 la struttura delle portanti pilota è fissa e pari a quella del massimo intervallo di guardia possibile, che si assume possa essere acquisito con l'impiego di metodi tradizionali basati su operazioni di correlazione. Il simbolo pilota e la posizione delle sottoportanti nel simbolo P2 sono indipendenti dagli altri parametri di trasmissione come ad esempio l'estensione di banda (§ 7.6) ed i metodi PAPR (§ 11.2).

Lo standard DVB-T2 prevede opzioni nelle quali è trasmesso un numero ridotto di simboli pilota nel payload (esempio PP8 in tabella 2) e la stima di canale si basa sulla stima iniziale fornita dal simbolo P2 e seguita da stime (DA), basate sui dati ricevuti, demodulati e corretti, che ricodificati e modulati agiscono come portanti pilota note. Questo metodo, denominato CD3, è stato svilippato dal Centro Ricerche Rai [13,14] e consente una trasmissione molto efficiente, adatta soprattutto in configurazioni SFN, dove gli echi sono generalmente molto lunghi ed un profilo di portanti pilota ad alta densità in frequenza sarebbe necessario in alternativa per una stima corretta della funzione di trasferimento del canale.

Come per il DVB-T il valore assunto dalle celle pilota $p_{n;k}$, SP o CP, dipende dall'indice della portante k, ma a differenza del DVB-T, essi dipendono anche dall'indice n del simbolo OFDM. Tutti i simboli pilota (CP, SP, P2) in ogni simbolo OFDM sono moltiplicati per 1 o -1 conformemente ad una sequenza pseudo casuale a livello di trama.

Ciò consente un approccio alternativo e più robusto relativamente alla sincronizzazione di trama, in grado di fornire la posizione attuale all'interno della trama anche nel caso in cui il preambolo venga perso a causa per esempio di un forte rumore di tipo impulsivo.

Inoltre, gli algoritmi di sincronizzazione possono sfruttare questa sequenza a livello di trama per stimare e monitorare la sincronizzazione a livello di clock, simbolo, frequenza e trama.

Tutto ciò può avvenire senza nessuna influenza sulla qualità della stima di canale.

11. Ulteriori caratteristiche a radiofrequenza

11.1 Trasmissione con antenne multiple

Lo standard DVB-T2, come già il DVB-T, consente la trasmissione simultanea del segnale sulla stessa frequenza da parte di differenti trasmettitori al fine di realizzare una rete a singola frequenza SFN. Garantendo stringenti requisiti di sincronizzazione, in una rete SFN i ricevitori "vedono" un canale equivalente ottenuto per sovrapposizione dei canali relativi a più trasmettitori. Una delle criticità della modalità SFN si presenta ove si riscontri la presenza di due segnali di livello elevato provenienti da due trasmettitori distinti di una stessa rete, il che determina una significativa riduzione di margine in quanto il canale risultante può presentare profondi "buchi" (notches) nello spettro di frequenza.

Lo standard DVB-T2 introduce, come opzione, l'uso di una strategia che prevede la trasmissione di due segnali differenti da parte di due trasmettitori adiacenti, secondo la tecnica di Alamouti [15]. Si tratta di un approccio efficiente per sfruttare la presenza di molteplici antenne trasmissive, utile anche nel caso in cui il ricevitore sia equipaggiato con un'antenna singola (MISO). Con ciò si ottiene un incremento di copertura in reti SFN.

I segnali delle due antenne trasferiscono gli stessi dati ma codificati in maniera differente in spazio e frequenza" (SF coding), secondo una variante della tecnica Alamouti, in modo tale che, in ricezione, sia possibile combinarli in maniera semplice per ottenere la decodifica ottima dei simboli originali.

Si ricorda che la codifica di Alamouti (codice spazio temporale a blocchi 2x1 ortogonale) è stata originariamente proposta per la realizzazione di sistemi con trasmissione in diversità "con codifica in spazio-tempo" (ST coding) [16] rappresentabili da una matrice come quella riportata in figura 19 in cui le colonne rappresentano antenne adiacenti e le ordinate rappresentano istanti temporali consecutivi. L'elemento (i,j) della matrice rappresenta il simbolo trasmesso dall'antenna i all'istante temporale j.

La trasformazione della codifica di Alamouti al dominio Spazio Frequenza con uso della tecnica OFDM è piuttosto immediata: in figura 20 [4] è illustrato graficamente lo schema del DVB-T2, dove si è adottata una versione modificata della tecnica di Alamouti nel dominio Spazio-Frequenza che consente di trasmettere il segnale dal primo trasmettitore invariato rispetto alla trasmissione SISO convenzionale. Si sono indicati con s1 ed s2 i due punti della costellazione utilizzata dal sistema, corrispondenti a due simboli consecutivi nello flusso di dati da trasmettere. Il primo trasmettitore invia i valori s1 e s2 utilizzando, nell'n-esimo blocco OFDM, i gruppi di sottoportanti indicati con k ed l rispettivamente; il secondo trasmettitore invece, nell'n-esimo blocco OFDM invia -s2* e s1* (si indica con il simbolo * il complesso coniugato) utilizzando rispettivamente i gruppi di frequenze k ed l.

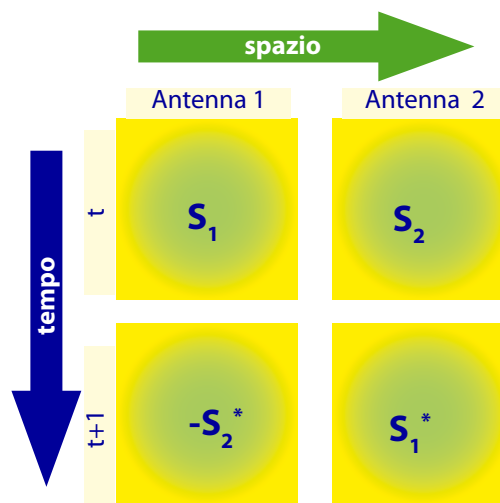



Fig. 19 - Codifica di Alamouti in Spazio (due antenne trasmittenti) - Tempo.

Con ciò il ricevitore si trova in una situazione di ricezione simile al caso di codifica Spazio-Tempo, in cui dai segnali ricevuti è possibile ricavare in maniera semplice la combinazione per la decodifica ottima dei simboli originali.

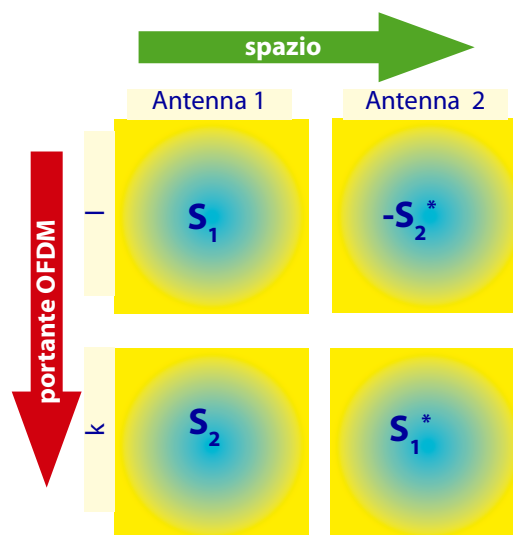



Fig. 20 - Estensione della codifica di Alamouti in Spazio (due antenne trasmittenti) - Frequenza (gruppi di frequenze distinti dello stesso blocco OFDM).

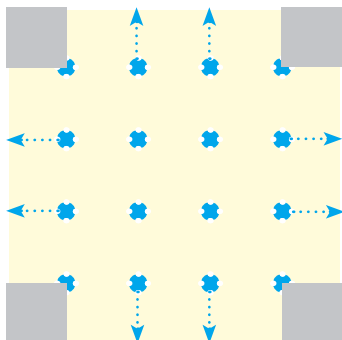



Fig. 21 - Tecnica ACE.

Questa tecnica fornisce prestazioni equivalenti ad una ricezione in diversità. Nel caso di ricezione in diversità infatti il ricevitore opera una combinazione ottima per la decodifica dei due segnali ricevuti distintamente (la tecnica è la cosiddetta two branch MRRC). Così facendo ricava un segnale uguale a quello che potrebbe essere ricevuto da un ricevitore (non operante in diversità), risultante dalla combinazione, nel canale radio, di due opportuni segnali trasmessi, circostanza questa che corrisponde proprio a ciò che accade nella trasmissione in diversità.

La complessità aggiuntiva di tale tecnica si traduce nell'inclusione di un numero ridotto di moltiplicatori e non è quindi significativa.

Tuttavia per una stima efficiente delle risposte dei canali h1 e h2 è anche necessario prevedere modifiche alle configurazioni pilota. Il DVB-T2 usa la stessa configurazione delle portanti pilota del caso SISO, ma corrispondenti ad intervalli di guardia dimezzati. I trasmettitori che funzionano come antenna 1 usano la stessa struttura di portanti pilota della configurazione SISO, mentre i trasmettitori che rappresentano l'antenna 2 invertono il valore trasmesso da una portante pilota su due.

L'uso di tale tecnica previene fenomeni di fading piatto in ricezione ed analisi preliminari predicono un incremento dell'ordine del 30% nell'area di copertura di una rete SFN.

11.2 Riduzione del rapporto tra picchi del segnale e potenza media

All'aumentare del numero di portanti, il segnale OFDM tende sempre più ad assomigliare a rumore Gaussiano, con la conseguenza che il rapporto tra potenza di picco e potenza media (PAPR) risulta elevato. Ciò impone dei vincoli sul funzionamento degli amplificatori di potenza nei trasmettitori, che provocano una riduzione dell'efficienza degli stessi. La riduzione del rapporto tra picchi del segnale e potenza media permette di usare amplificatori con valori di back-off (rapporto tra la potenza d'uscita dell'amplificatore e la sua potenza massima) ridotti.

Nello standard DVB-T2 è previsto, allo scopo, l'uso combinato di due tecniche:

- ACE che prevede una distorsione delle costellazioni di modulazione, muovendo i punti più esterni delle costellazioni trasmesse verso locazioni ad ampiezza maggiore (figura 21). La tecnica ACE riduce il PAPR senza perdita di capacità, ma non è utilizzabile nel caso di rotazione delle costellazioni e CD3.
- TR che prevede la cancellazione dei picchi direttamente nel dominio temporale mediante un insieme di kernel di tipo impulsivo costruiti mediante una piccola percentuale (1%) di portanti riservate e non utilizzate per la trasmissione dei dati: sono modulate con ampiezza e fase opportuna per evitare picchi di ampiezza sul segnale OFDM. Il metodo TR adottato dal DVB-T2 riserva allo scopo alcune portanti riducendo così leggermente la capacità trasmissiva. Queste sono utilizzate per trasferire opportuni valori che consentono la sintesi di una forma d'onda in grado di cancellare i picchi di segnale rilevati.

Le due tecniche sono complementari nel senso che la tecnica ACE presenta prestazioni migliori con modulazioni di ordine più basso, mentre TR opera più efficacemente con costellazioni di ordine più elevato. Non essendo mutuamente esclusive queste possono essere convenientemente applicate in maniera combinata consentendo di ottenere una

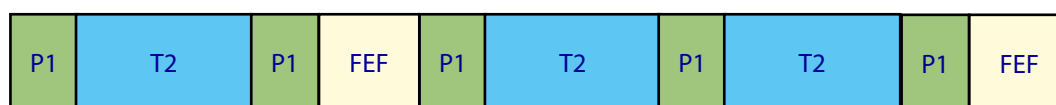



Fig. 22 - Coesistenza di trame fisiche T2 e trame fisiche FEF.

riduzione di circa il 20% del fabbisogno di potenza di picco del sistema.

11.3 Supporto di larghezze di banda 1,7 MHz e 10 MHz

Per rendere lo standard DVB-T2 adatto anche per usi professionali (ad esempio per trasmissione tra telecamere e studi) è stata prevista l'opzione di larghezza di banda pari a 10 MHz (come già nel DVB-T). È stata aggiunta anche l'opzione di larghezza di banda pari a 1,7 MHz per poter adottare lo standard anche nel caso di canalizzazioni più strette (ad esempio in banda III e in banda L).

11.4 Trame per estensioni future (FEF)

Nello standard DVB-T2 è stata prevista una sintassi che renda aperta la specifica a futuri sviluppi. Tali sono le cosiddette trame per estensioni future (FEF). L'unico attributo di questo tipo di trame è la presenza del simbolo P1 e l'indicazione della durata temporale della trama stessa (figura 22). Con ciò i ricevitori di prima generazione sono in grado di ignorare le trame FEF.

11.5 Transmitter identification

Per consentire l'identificazione del trasmettitore che emette un segnale T2 si aggiunge al segnale principale un segnale di livello basso (-40dB) che convoglia tale informazione.

Questo risulta particolarmente importante per i ricevitori di tipo professionale, in quanto consente, ad esempio, di identificare eventuali guasti in una rete SFN.

12. Simulazioni della prestazioni e confronto con il DVB-T

Il DVB-T2 è caratterizzato da una molteplicità di modi di funzionamento, che consentono di variare il bit rate su canali da 8 MHz approssimativamente da 7 Mbit/s a 50 Mbit/s e corrispondentemente il rapporto segnale rumore richiesto su canale AWGN da 1 dB a 22 dB (su canali affetti da fading da 2 dB a 26 dB), a seconda del livello di rumore e dalle statistiche di canale.

La figura 23 riporta le prestazioni del sistema confrontate con il limite teorico di capacità del canale e con il sistema di prima generazione DVB-T. I dati della figura sono tratti da [17] e confrontano su canale AWGN, assumendo demodulazione ideale, non tenendo conto dell'intervallo di guardia e delle portanti pilota, né dei simboli di segnalazione[Nota 3].

Il guadagno in efficienza spettrale offerto dal nuovo schema di codifica LDPC-BCH rispetto alla concatenazione convoluzionale-RS è pari a circa il 25%. Il guadagno in termini di rapporto segnale rumore C/N varia da 3 a 4 dB.

La scelta di alcuni parametri, come la dimensione dell'FFT, l'intervallo di guardia e la configurazione

Nota 3 - Si tenga comunque conto che grazie alle configurazioni ottimizzate delle portanti pilota del DVB-T2, la perdita di prestazioni del DVB-T2 nelle implementazioni reali sarà nettamente minore rispetto al DVB-T.

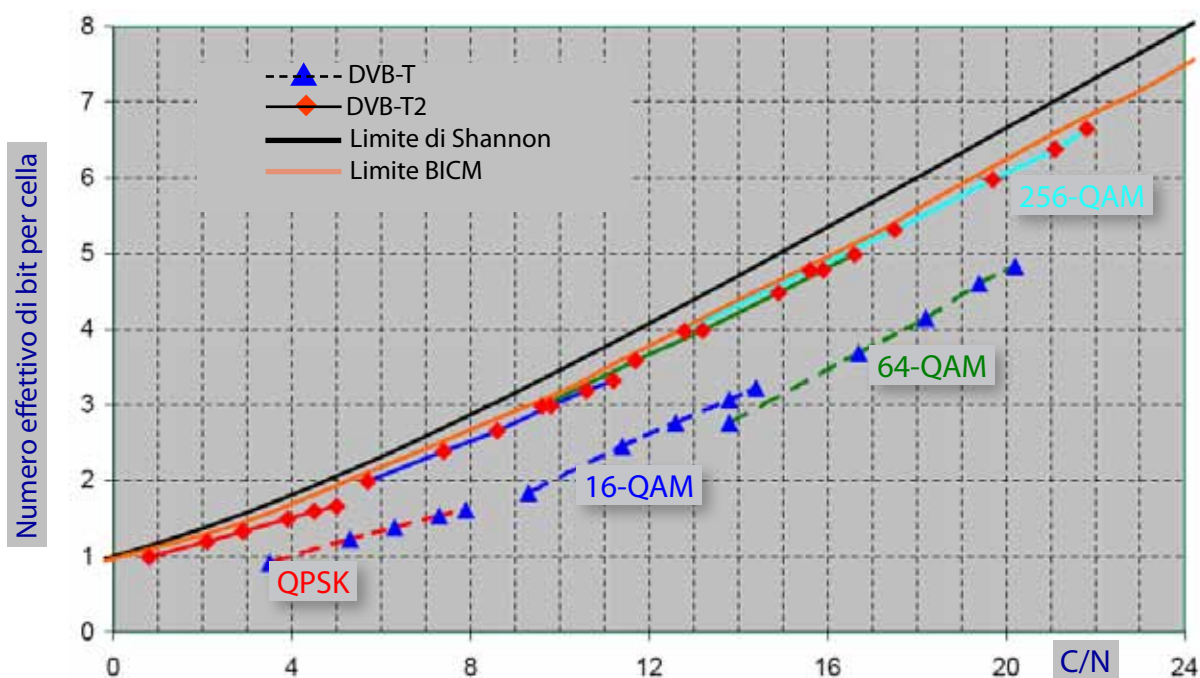



Fig. 23 Capacità del DVB-T e del DVB-T2 a confronto.

di portanti pilota, è dettata da esigenze di pianificazione di rete (MFN vs. SFN) e da tipologia di servizio (ricezione fissa, portatile o mobile). I parametri generalmente consigliati sono:

- in ricezione fissa 32K FFT (adatto ad un canale abbastanza statico) con intervallo di guardia 1/128 per reti MFN e da 1/16 fino a 19/128 (532 μs) per reti SFN. In entrambe i casi la configurazione si completerebbe con la modulazione 256-QAM con code rate 3/5 o 2/3. Il tutto per una capacità di 36 ÷ 40 Mbit/s per MFN e 29 ÷ 38 Mbit/s per SFN;
- Per ricezione portatile o mobile FFT di minore grandezza e costellazioni più robuste. Ad esempio: 8K FFT e 64-QAM con code rate 1/2 or 3/5 assicurano la ricezione in canali più dinamici e con un rapporto segnale/rumore inferiore. Il tutto per una capacità di 16 ÷ 26 Mbit/s a seconda degli altri parametri scelti.

La tabella 2, tratta da [17], riporta le capacità disponibili per sistemi DVB-T2 (con larghezza di banda 8MHz e trasmissione con antenna singola), tabulate per dimensione della FFT 32K, con intervallo di guardia di 1/128 e 1/16, rispettivamente con configurazione di portanti pilota PP7 e PP8, il tutto per differenti valori di FEC rate e dimensione della costellazione (16, 64, 256 QAM).

Configurazione	FEC rate	bit rate [Mbit/s]		
		16 QAM	64 QAM	256 QAM
32K FFT 1/128 CP PP7	3/5	18,1	27,0	36,1
	2/3	20,1	30,2	40,2
	3/4	22,6	33,8	45,2
	4/5	24,1	36,1	48,3
	5/6	25,2	37,8	50,3
32K FFT 1/16 CP PP8	3/5	17,0	25,6	34,2
	2/3	18,9	28,5	38,1
	3/4	21,3	32,1	42,9
	4/5	22,8	34,2	45,7
	5/6	23,7	35,7	47,7

Tab. 2 - Bit-rate ottenibili per alcune configurazioni di DVB-T2.

	Modalità corrente DVB-T nei MUX nazionali MFN	Esempio DVB-T2
Canale RF	8 MHz	8 MHz
Modulazione	64 QAM	256 QAM
Dimensione FFT	8K	32K
Intervallo di guardia (CP)	1/32	1/128
FEC	2/3 CC + RS	3/5 LDPC + BCH (0,3%)
Config. Scattered Pilots	—	PP7
% overhead per Scattered Pilots	8 %	1 %
% overhead per Continual Pilots	3 %	0,53 %
% overhead per P1 / P2	0 %	0,7 %
Occupazione banda	normale	estesa
SNR in ricezione	17 dB	17 dB
Capacità netta	24,1 Mbit/s	36,1 Mbit/s
Guadagno in capacità		49,6 %
n. Programmi SDTV	≈ 5 MPEG-2	≈ 16 MPEG-4 AVC
n. Programmi HDTV		≈ 4 MPEG-4 AVC

Tab. 3 - Valutazione di una configurazione tipica di MFN adottata in Italia e relativo confronto con una equivalente in DVB-T2.

	Modalità corrente DVB-T nei MUX nazionali SFN	Esempio DVB-T2
Canale RF	8 MHz	8 MHz
Modulazione	64 QAM	256 QAM
Dimensione FFT	8K	32K
Intervallo di guardia (CP)	1/4	1/16
FEC	2/3 CC + RS (8%)	3/5 LDPC + BCH (0,3%)
Config. Scattered Pilots	—	PP7
% overhead per Scattered Pilots	8 %	1 %
% overhead per Continual Pilots	3 %	0,53 %
% overhead per P1 / P2	0 %	0,7 %
Occupazione banda	normale	estesa
SNR in ricerzione	17 dB	17 dB
Capacità netta	19,9 Mbit/s	34,2 Mbit/s
Guadagno in capacità		72 %
n. Programmi SDTV	≈ 4 MPEG-2	≈ 15 MPEG-4 AVC
n. Programmi HDTV		≈ 4 MPEG-4 AVC

Tab. 4 - Valutazione di una configurazione tipica di SFN adottata in Italia e relativo confronto con una equivalente in DVB-T2.

12.1 Confronto tra configurazioni tipiche MFN e SFN

A titolo di esempio vengono presentate alcune configurazioni di rete tipiche, e viene illustrato il beneficio ottenibile con l'utilizzo del nuovo standard DVB-T2 in sostituzione al DVB-T.

Un primo esempio, illustrato in tabella 3, rappresenta parametri tipici adottati in Italia per una configurazione MFN di multiplex DVB-T: corrispondentemente, per un sistema DVB-T2, è stato scelto di massimizzare l'efficienza spettrale a parità delle altre condizioni al contorno.

Risultano evidenti il guadagno (+ 50 %) in capacità ed il corrispondente aumento di programmi irradiabili (circa il triplo a parità di qualità oppure poco meno del medesimo numero scegliendo di irradiare HDTV al posto di SDTV).

Un secondo esempio riguarda una tipica configurazione SFN, anche questa mirata alla situazione nazionale corrente. I dati, illustrati in tabella 4, confrontano la tipica configurazione SFN DVB-T adottata in Italia, con una corrispondente soluzione DVB-T2.

La configurazione DVB-T determina una capacità trasmissiva di 19,9 Mbit/s su canale fisso con SNR di 17 dB. Nelle medesime condizioni del canale, un sistema DVB-T2 con banda estesa e parametri 32K FFT, 1/16 CP, PP8, 256 QAM e LDPC code rate pari a 3/5, fornisce una capacità trasmissiva di 33.3 Mbit/s, con un guadagno del 72%.

13. Conclusioni

Dalle specifiche DVB-T2 illustrate in precedenza emergono una serie di considerazioni di carattere generale.

- Si tratta di un ottimo standard che richiede però uno sviluppo completamente nuovo di tutta l'elettronica per la codifica di sorgente e di canale, pertanto sarà necessaria la sostituzione degli IRD domestici.
- Si presenta come uno standard stabile (con improbabili evoluzioni a tempi brevi) perché l'efficienza spettrale è prossima al limite teorico (Shannon). L'impegno per la sostituzione degli IRD, sarà quindi compensato da una loro lunga durata nel tempo.
- I siti di trasmissione e gli impianti d'antenna domestici non dovrebbero richiedere modifiche.
- Lo standard è molto flessibile, sia in termini di varietà dei dati in ingresso (non limitati al TS) sia per la possibilità di rendere più robusta la trasmissione di servizi/programmi di particolare interesse o destinati ad un'utenza in condizioni critiche di ricezione.
- Lo standard rappresenta il driver per l'introduzione dei servizi HDTV. L'impiego dello standard DVB-T2 congiuntamente a codifiche video di ultima generazione (MPEG-4 AVC) consente di ottenere un guadagno di capacità trasmissiva utilizzabile per introdurre servizi HDTV quasi a costo nullo in termini di occupazione di banda.

Tali aspetti sembrano costituire i punti chiave che determineranno nel prossimo futuro il possibile successo dello standard.

Bibliografia

1. G.F. Barbieri, "Gli standard DVB: dalla TV generalista ai servizi multimediali interattivi", Elettronica e Telecomunicazioni, dicembre 2004.
2. ETSI EN 302 307 V1.1.2 (2006-06), "Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications".
3. A. Morello, V. Mignone, "Il sistema DVB-S2 di seconda generazione per la trasmissione via satellite e Unicast", Elettronica e Telecomunicazioni, Dicembre 2003.
4. Draft ETSI EN 302 755 V1.1.1 (2008-10), "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)".
5. N. Benvenuto, A. Filippi, V. Mignone, A. Morello, C. Nokes, J. Stott, S. Tomasin, L. Vangelista, M. Vlot, "Key technologies of the DVB-T2 standard" – di prossima pubblicazione in IEEE Comm. Magazine.
6. ISO/IEC 14496-10:2008, "Information Technology - Coding of audio visual objects - Part. 10: Advaced Video Coding.
7. M. Barbero, N. Shpuza, "Advanced Video Coding (AVC - H.264): il prossimo futuro", Elettronica e Telecomunicazioni, aprile 2003
8. D. Marpe, T. Wiegand, G. J. Sullivan, "The H.264/MPEG4 Advanced Video Coding Standard and its Applications", IEEE Comm. Magazine, agosto 2006.
9. "DVB-T2 Call for Technologies" – DVB Document SB 1644r1 – aprile 2007.
10. R. Gallager: "Low Density Parity Check Codes" – IRE Trans. on Info. Theory, gennaio 1962
11. B. Le Floch, M. Alard, and C. Berrou, "Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex", in Proc. IEEE, Vol. 83(6):587–592, giugno 1986.
12. V. Mignone, "La modulazione COFDM", Elettronica e Telecomunicazioni, dicembre 2005
13. V. Mignone, A. Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", in IEEE Transaction on Communications, vol. 44, 279 n. 9, settembre 1996
14. V. Mignone, A. Morello, B. Sacco, M. Visintin, "CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su rete isofrequenza", Elettronica e Telecomunicazioni, n.2, agosto 2002.
15. Alamouti, S.M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications ," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.16, 277 no.8, pp.1451-1458, ottobre 1998.
16. Wei Zhang, Xiang-Gen Xia, Khaled Ben Letaief, "Space-Time/Frequency Coding For Mimo-OFDM In Next Generation Broadband Wireless Systems", IEEE Wireless Communications, giugno 2007
17. Draft ETSI TR 102 831, "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)

Appendice

1.1 Time Frequency Slicing (TFS)

L'annesso E dello standard [4] illustra la tecnica TFS che fornisce la possibilità di distribuire un multiplex su un certo numero di frequenze collegate. L'annesso è solo informativo, non esiste pertanto vincolo di implementazione nei decoder.

Con questa tecnica il ricevitore d'utente "insegue" il programma selezionato dall'utente "saltando" da un canale all'altro in modo sincronizzato. Per far ciò è necessario che il decoder disponga di due sezioni per la sintonia a radiofrequenza e demodulazione.

Da lato operatore, si tratta di una tecnica utilizzabile solo quando gestisce più canali a radiofrequenza, con tecnica DVB-T2, dai medesimi siti di trasmissione, esattamente con la stessa copertura.

La TFS permette di ottenere un guadagno di rete, legato al fatto che la propagazione del segnale è diversa nei vari canali RF. Il segnale, saltando da una frequenza all'altra, poi rimescolato dall'interleaver temporale, può recuperare eventuali porzioni sotto soglia di rumore. In una configurazione con 4 canali RF il guadagno può essere di 2-3 dB, corrispondente ad un incremento di bit-rate del 20-25%.

Fig. A1 - Esempio di "inseguimento" ottenuto applicando il TFS su 4 canali a radiofrequenza.

Un ulteriore vantaggio è ottenibile grazie alla multiplazione statistica. Un programma, a qualità audio-video costante, richiede un bit-rate trasmissivo variabile a seconda della complessità della scena. E' quindi possibile variare dinamicamente la porzione di capacità di un multiplex assegnata ai singoli programmi che lo compongono in modo da ottimizzare la loro qualità e contemporaneamente minimizzare il bit-rate medio per programma. Il guadagno legato alla multiplazione statistica è tanto più significativo quanto più ampio è il numero di programmi a cui si applica e di conseguenza quanto più grande è la capacità del multiplex in termini di bit-rate totale.

La tecnica TFS, che consente di accorpare le risorse dedicate a più multiplex in un multiplex unico con capacità pari alla loro somma, è quindi in grado di fornire un significativo guadagno nella multiplazione statistica dei flussi.

Si può quindi ipotizzare che, se un programma HDTV MPEG-4 AVC richiede 10 Mbit/s: quattro-cinque programmi multiplati statisticamente richiedano 8.5 Mbit/s medi ciascuno (guadagno 15%); 10 programmi richiedano 7.5 Mbit/s medi ciascuno (guadagno 25%) e 20 programmi richiedano 7 Mbit/s medi ciascuno (guadagno 30%).

Nell'esempio in figura A1, quattro canali RF da 34 Mbit/s costituiscono, utilizzando la tecnica TFS, un unico multiplex statistico da 136 Mbit/s, quindi in grado di supportare 19 programmi HDTV. Nella configurazione convenzionale, i quattro canali RF separati hanno ciascuno una capacità di 34 Mbit/s (sufficiente per 4 programmi HDTV a 8,5 Mbit/s medi) e quindi la capacità totale, considerando i 4 multiplex, è pari a "solo" 16 programmi HDTV.

Il digitale terrestre di seconda generazione

Andrea **Bertella,** Vittoria **Mignone,** Bruno **Sacco,** Mirto **Tabone**
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Torino

1. Dimostrazione del DVB-T2 in occasione del Prix Italia

Sommario
Lo standard DVB-T2 è nato in ambito DVB nel 2008 sulla scia del successo dello standard di diffusione satellitare DVB-S2, con l'obiettivo di portare all'utente i servizi in Alta Definizione (HDTV) con un uso ottimizzato della risorsa spettrale. In pratica in un canale terrestre da 8 MHz si potrà trasmettere un multiplex DVB-T2 contenente 4 programmi in HD.
Il DVB-T2 ha prestazioni vicine all'ottimo teorico, e offre un incremento di capacità trasmissiva a parità di banda occupata che può andare oltre il 50%. Per questo motivo il DVB-T2 è la soluzione ideale per l'introduzione della televisione ad alta definizione, che può sostituire quella tradizionale senza quasi provocare decremento del numero programmi attualmente diffusi. Il passaggio al DVB-T2 non comporterà modifiche nei siti trasmittenti e nelle antenne riceventi a casa dell'utente, ma richiederà la sostituzione dei ricevitori che, con l'occasione, potrebbero adeguarsi alla ricezione della TV ad alta definizione, comunque non possibile nella maggioranza dei decoder attuali a standard DVB-T. Il percorso di ricerca e sviluppo che ha portato alla definizione di questo nuovo standard è stato seguito per la Rai dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT). Le tappe significative della storia del DVB-T2 in Italia sono state la prima diffusione sul territorio italiano di un multiplex DVB-T2 (19 novembre 2008) e la Plug Fest (Febbraio-Marzo 2009), evento al quale hanno partecipato molti dei costruttori degli apparati di trasmissione e ricezione a standard DVB-T2. La storia del DVB-T2 si arricchisce con la dimostrazione al Prix Italia di un nuovo e importante tassello che certamente favorirà la sua divulgazione presso un pubblico ampio che potrà così apprezzarne gli straordinari contenuti tecnici e gli enormi vantaggi rispetto alla prima generazione del digitale terrestre.

Fra le dimostrazioni realizzate per degli 80 anni del Centro Ricerche, in occasione del Prix Italia a Torino, quella relativa al sistema DVB-T2 presenta le principali caratteristiche del nuovo standard per la diffusione digitale su canale terrestre e in particolare:

- la maggiore capacità derivata dalla nuova modulazione digitale DVB-T2, per cui il canale trasmissivo è in grado di convogliare quattro programmi HDTV anziché i due che rappresentano la capacità del sistema DVB-T.
- La possibilità di utilizzare gli impianti di antenna domestici esistenti e l'attuale infrastruttura di trasmettitori.
- La possibilità di utilizzare il DVB-T2 per trasmettere un segnale 4K (3840X2160), ovvero un programma con quattro volte la risoluzione dell'alta definizione.

La dimostrazione al Prix Italia è il seguito di due importanti eventi riguardanti il digitale terrestre di seconda generazione che si sono svolti nei laboratori del Centro Ricerche della Rai: la prima trasmissione DVB-T2 in Italia e la "Plug-Fest".

1.1 La prima trasmissione DVB-T2 in Italia

Dal Novembre 2008 è partita la prima diffusione sul territorio italiano di un multiplex DVB-T2. Per la Rai l'iniziativa è stata condotta da Strategie Tecnologiche con il Centro Ricerche, in collaborazione con RaiWay S.p.A.

Il Centro Ricerche ha partecipato attivamente alla definizione di questo nuovo standard.

La trasmissione è effettuata dal sito trasmittente Rai Way di Torino Eremo utilizzando il canale UHF 29 in polarizzazione verticale (figura 1). Il modulatore e il trasmettitore sono stati sviluppati e realizzati dalla azienda italiana Screen Service. La configurazione di trasmissione correntemente utilizzata prevede costellazione 256QAM, FEC 3/5, FFT 32k, intervallo di guardia 1/128, con bit rate utile di circa 36Mbit/s. La potenza di apparato del trasmettitore è pari a circa 200 W: questa potenza e lo schema di modulazione adottato permettono di coprire gran parte dell'area urbana della città di Torino e alcuni comuni limitrofi nella periferia nord.

La capacità trasmissiva disponibile viene impiegata per trasmettere 4 programmi in alta definizione che nell'attuale fase di test comprendono un evento sportivo (Olimpiadi di Torino 2006), un programma culturale (l'opera lirica "Aida" che ha inaugurato la stagione alla Scala nel dicembre 2006), una fiction ("Gente di mare", fiction girata in alta definizione) e un programma musicale (il concerto di Bruce Springsteen durante il Super Bowl 2009).

Il flusso Transport Stream viene inviato dal Centro Ricerche al Centro Trasmittente RaiWay di Torino Eremo per mezzo di un ponte radio digitale SDH.

Fig. 1 - Torino, 19 novembre 2008. accensione del DVB-T2 al trasmettitore RaiWay dell'Eremo.

In figura 2 è riportata un'immagine relativa alla conferenza stampa in cui è stata data notizia della trasmissione DVB-T2 sul territorio della città di Torino. In questa occasione uno dei programmi è stato sostituito con la ripresa live della sala in cui si è tenuta la conferenza stampa.

Il segnale DVB-T2 è monitorato mediante un apparato Screen Service che permette di analizzare la qualità della trasmissione per mezzo del Modulation Error Ratio (MER) e di visualizzare la costellazione. Una schermata del software di analisi è riportato in figura 3.

Il ricevitore utilizzato per le prime trasmissioni DVB-T2 è stato sviluppato dalla ditta spagnola SIDSA.

1.2 La Plug-Fest

Nel mese di Febbraio 2009 si è svolta presso il Centro Ricerche un'importante manifestazione denominata Plug-Fest con lo scopo di interconnettere modulatori e demodulatori DVB-T2 di diversi costruttori al fine di verificare l'interoperabilità degli apparati in diversi modi previsti dallo standard.

All' evento hanno partecipato molti dei costruttori degli apparati di trasmissione e ricezione a standard DVB-T2: BBC, DekTec, Enensys, Panasonic, Rohde &

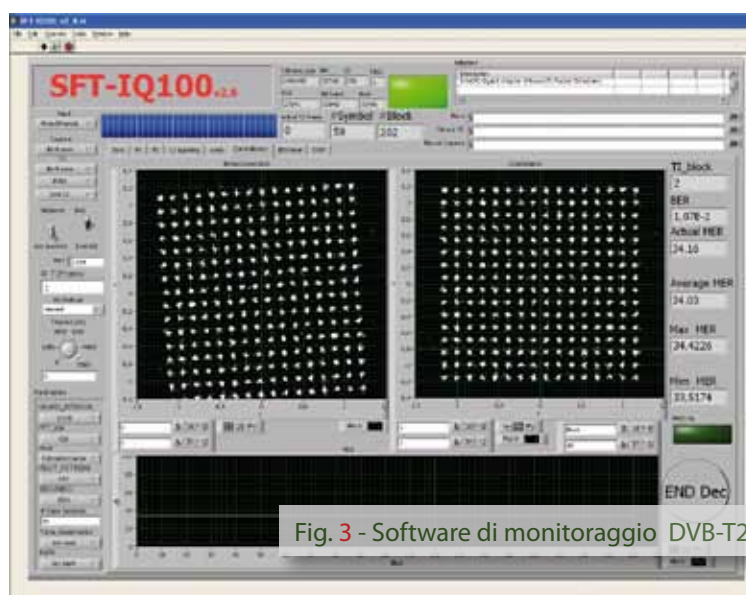



Fig. 3 - Software di monitoraggio DVB-T2.

Fig. 2 - Torino, 16 dicembre 2008.
Il direttore del Centro Ricerche Alberto Morello (a destra) illustra le caratteristiche del nuovo sistema DVB-T2 ai professionisti del settore.

Schwarz, SIDSA, Sony, Screen Service e TeamCast (figura 4).

I modulatori forniti dai partecipanti erano nella maggior parte dei casi dei prodotti ormai pronti per essere introdotti sul mercato mentre i ricevitori erano tutti dei prototipi in attesa della realizzazione del chip prevista per il IV quadrimestre del 2009. I primi ricevitori DVB-T2 commerciali sono attesi per la fine dell'anno.

Il Centro Ricerche ha messo a disposizione i laboratori la strumentazione, e la pluridecennale esperienza dei suoi tecnici sulle tecniche digitali e RF.

La manifestazione si è rivelata un grande successo, sia in termini di partecipazione, a dimostrazione dell'interesse dell'industria nei confronti del DVB-T2, sia di risultati ottenuti, dimostrando un ottimo livello di interoperabilità tra i diversi modulatori e demodulatori, in un elevato numero di configurazioni. Più in dettaglio, si è verificato il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- ✓ Ottimo livello di interoperabilità tra i diversi modulatori e demodulatori nelle configurazioni con singolo flusso di ingresso TS (Transport Stream), per oltre 50 differenti modi testati, con differenti parametri di modulazione (costellazione - incluse le nuove costellazioni ruotate introdotte per la prima volta nel DVB-T2 - FEC, FFT, intervallo di guardia);
- ✓ Buon livello di interoperabilità su un limitato numero di modi nelle configurazioni con flussi di ingresso multipli, con doppio segnale in trasmissione (MISO) e in modalità FEF, che aggiunge spazio nella trama del segnale in trasmissione per future nuove tecniche;
- ✓ Test preliminari di prototipi di T2 Gateway condotti con successo

Fig. 4 - Torino, febbraio 2009.
Plug Fest nei laboratori del Centro Ricerche

Non è invece stata analizzata l'interoperabilità in presenza della tecnica PAPR di correzione dell'inviluppo del segnale in trasmissione, in quanto non ancora implementata nei dispositivi presenti alla Plug Fest

Fig. 5 - Software T2Xpert della ditta Dektec.

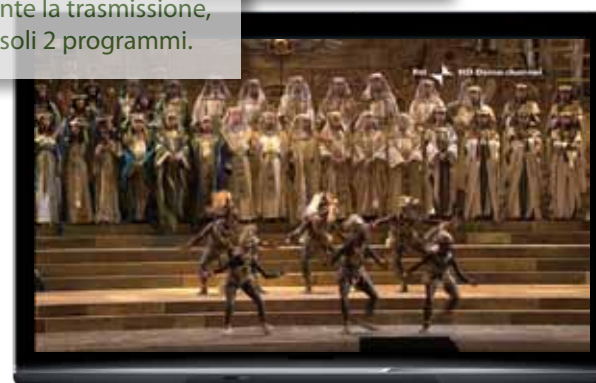
1.3 In occasione degli 80 anni del Centro Ricerche

La dimostrazione in occasione del Prix Italia a Torino prevede la trasmissione del segnale DVB-T2 con il seguente schema di modulazione: costellazione 256QAM, FEC 3/5, FFT 32k, intervallo di guardia 1/128 (bit rate utile di circa 36Mbit/s).

Il ricevitore utilizzato durante questa dimostrazione è quello fornito dalla ditta olandese DekTec: si tratta di una scheda installata a bordo di un PC con relativo software sviluppato dalla medesima ditta.

In figura 5 è riportata una schermata del software.

L'uscita del ricevitore DVB-T2 (IP) viene mandata a 4 decoder H264 la cui uscita in HD-SDI alimenta 4 schermi al plasma che permettono di visualizzare contemporaneamente i programmi, come illustrato in figura 6.

Fig. 6 - Grazie al DVB-T2, in un solo canale a radiofrequenza possono essere allocati 4 programmi HDTV, mentre il DVB-T consente la trasmissione, a parità di banda, di soli 2 programmi.

2. Overview del sistema DVB-T2

Grazie all'adozione delle più moderne tecniche di modulazione e codifica di canale il DVB-T2 [1,2] ha prestazioni vicine all'ottimo teorico, e offre tangibili vantaggi in termini di incremento di capacità trasmissiva a parità di banda occupata (+50%), oppure di copertura del territorio a parità di potenza emessa, rispetto al DVB-T [3].

La tecnica di suddivisione dei dati in trame di banda base (BBFRAME) e codifica di canale (FEC) sono le stesse del sistema di seconda generazione satellitare DVB-S2 [4]. Il codice FEC è quindi basato sulla concatenazione tra codici LDPC (Low Density Parity Check) [5] e BCH (Bose Chaudhuri Hocquenghem), tecnica che fornisce prestazioni eccellenti non solo su canali satellitari ma anche in ambiente terrestre.

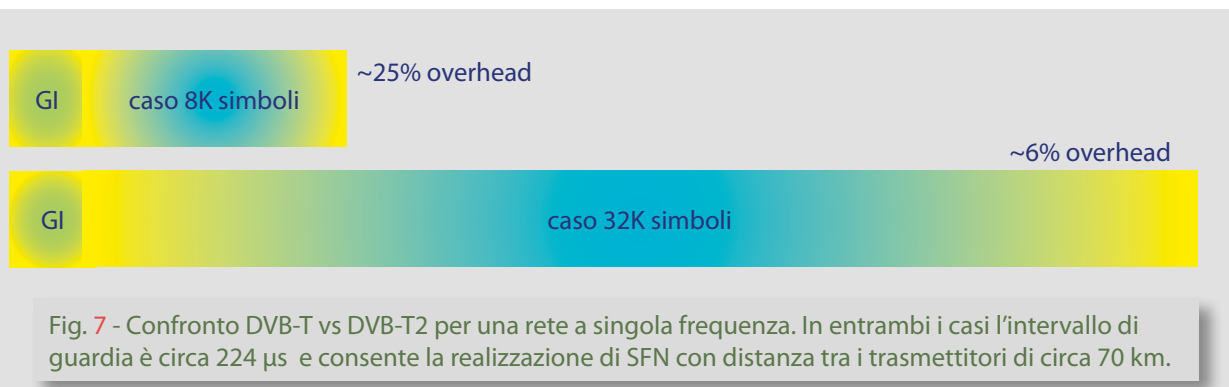
Le costellazioni sono derivate dal DVB-T (QPSK, 16QAM, 64QAM), con estensione alla 256QAM e introduzione della tecnica delle costellazioni ruotate, per migliorare significativamente le prestazioni del sistema in canali terrestri particolarmente critici.

La tecnica base di modulazione è la modulazione multi portante OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con intervallo di guardia, analoga al DVB-T, che garantisce un sistema di trasmissione affidabile su canali terrestri, caratterizzati da propagazione multicammino. Il DVB-T2 aumenta la scelta sulla dimensione della FFT (Fast Fourier Trasform, procedimento alla base della modulazione OFDM), da 1K (circa 1000) a 32K (circa 32000) portanti (il DVB-T offre due modi soltanto, 2K e 8K), e congiuntamente sono incrementati i possibili valori degli intervalli di guardia. Tutto ciò per offrire maggiore flessibilità di scelta di configurazione del sistema, in relazione alle caratteristiche della rete di trasmissione, e garantire un'efficienza trasmissiva significativamente più elevata rispetto al DVB-T. A titolo di esempio la figura 7 confronta una possibile configurazione DVB-T2 per una rete a Singola Frequenza (SFN) con il DVB-T: l'intervallo di guardia comporta una perdita di efficienza del 6% con il DVB-T2, a fronte di un 25% del DVB-T.

Il DVB-T2 amplia, rispetto al DVB-T, i possibili segnali per la sincronizzazione e la stima del canale RF (segnali pilota di tipo scattered e di tipo continuo) che possono essere scelti sulla base del particolare ambiente trasmissivo (8 possibili configurazioni di dispersione di celle pilota che possono portare ad un aumento della capacità trasmissiva rispetto al DVB-T fino all'8%).

Per fronteggiare meglio i diversi tipi di degradamento del segnale sul canale terrestre, il DVB-T2 introduce quattro livelli di interallacciamento dell'informazione (Bit, Cella, Tempo e Frequenza). L'interleaving temporale offre una profondità di interlacciamento di almeno 70 ms per i servizi a rate più elevati, con l'opzione di poter estendere tale valore senza necessità di incrementare la memoria del ricevitore. Ciò consente di ottenere una maggiore immunità a disturbi di tipo impulsivo e può consentire una migliore ricezione in condizioni di mobilità a velocità elevate.

Il DVB-T2 può trasportare flussi di ingresso singoli o multipli, di tipo Transport Stream o Generico (ad es. IP), ed ogni flusso (PLP, Physical Layer Pipe) può

Fig. 7 - Confronto DVB-T vs DVB-T2 per una rete a singola frequenza. In entrambi i casi l'intervallo di guardia è circa 224 μs e consente la realizzazione di SFN con distanza tra i trasmettitori di circa 70 km.

essere protetto (FEC e interleaving) in modo differente contro il rumore e le interferenze.

Ciò consente di trasportare servizi dedicati a terminali riceventi di tipo diverso, contemporaneamente, in modo ottimale per ciascuno (figura 8), e di introdurre il "Time Slicing" nello strato fisico, per un risparmio energetico nel ricevitore, che può rimanere acceso solo negli intervalli temporali in cui è presente il servizio di interesse. Nel DVB-T il Time Slicing non è presente, ed è stato introdotto nel DVB-H [6] negli strati superiori, per poter consentire un risparmio di batteria nei terminali d'utente.

Ulteriore sostanziale novità del DVB-T2 è la possibilità di trasmissione con antenne multiple, basata sulla tecnica di Alamouti [7], che consente di migliorare la ricezione grazie alla diversità spaziale offerta dai due trasmettitori (figura 9).

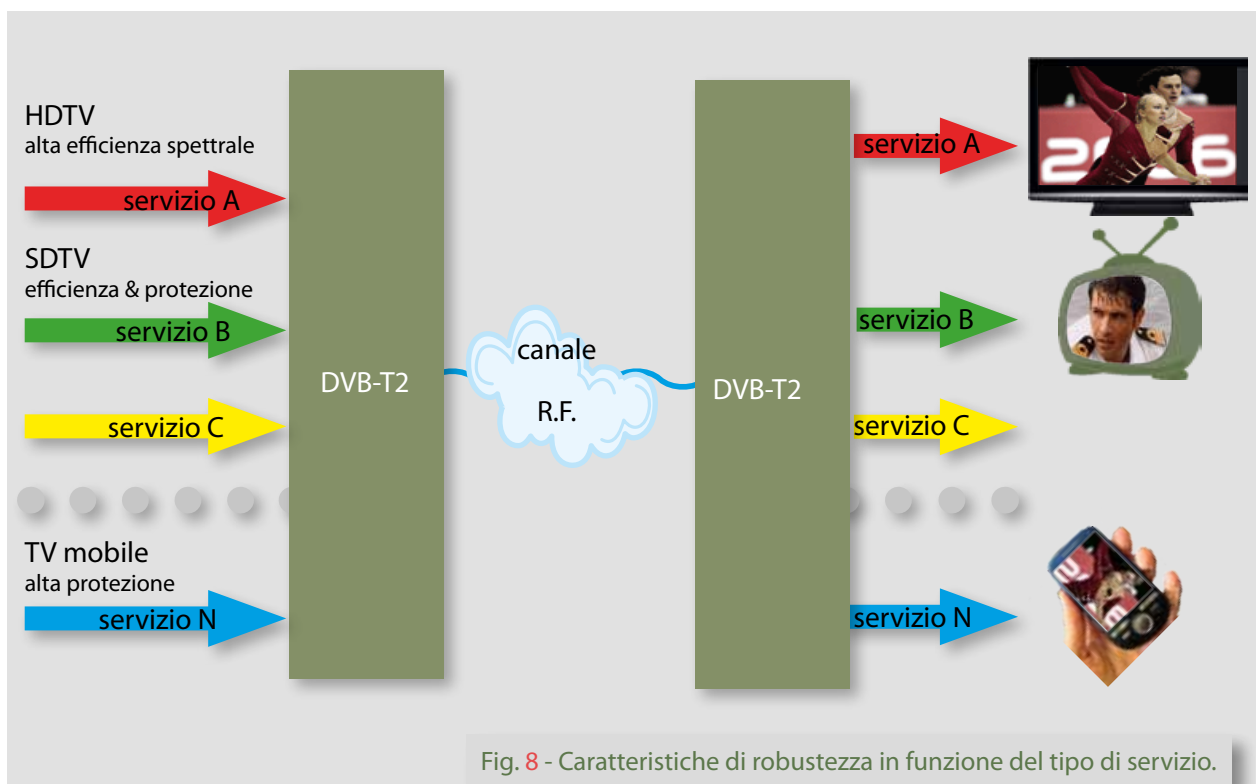
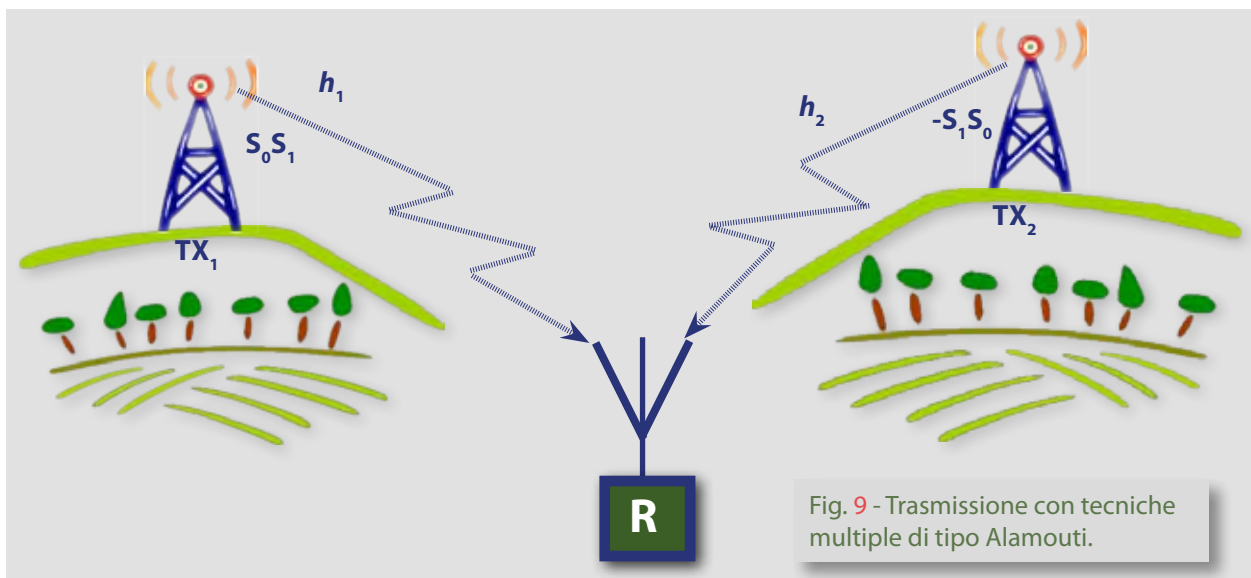
Inoltre, per ridurre il rapporto tra potenza di picco e potenza media del segnale trasmesso (PAPR), tipicamente è molto elevato per segnali di tipo OFDM, il DVB-T2 offre due meccanismi (basati l'uno sulla tecnica "Tone Reservation" e l'altro sulla "Active Constellation Extension"), per migliorare lo sfruttamento della potenza dei trasmettitori.

Infine, per poter essere "future proof" il DVB-T2 offre meccanismi (FEF, Future Enxtension Frame) per permettere in futuro l'introduzione nel sistema di ulteriori tecniche (ad esempio TFS, Time Frequency Slicing), preservandone la compatibilità all'indietro.

L'incremento di capacità trasmissiva si può quantificare in quasi il 50%; con le nuove codifiche di sorgente (MPEG-4 AVC) questo vantaggio diventa schiacciante: il DVB-T2 offre la possibilità di trasportare 4 programmi HD in un canale RF!

I dettagli relativi allo standard DVB-T2 si possono trovare in [8].

Fig. 8 - Caratteristiche di robustezza in funzione del tipo di servizio.

Fig. 9 - Trasmissione con tecniche multiple di tipo Alamouti.

Bibliografia

1. "Digital Video Broadcasting (DVB), BlueBook A122: Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", Giugno 2008.
2. Draft ETSI TR 102 831 V0.8.7 (2008-09): "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)".
3. ETSI EN 300 744: "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", Jan 2001.
4. ETSI EN 302 307 V1.1.2: "Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications", June 2006.
5. R. Gallager: "Low Density Parity Check Codes" – IRE Trans. on Info. Theory, Jan 1962.
6. EN 302 304 V1.1.1. "Digital Video Broadcasting (DVB): Transmission System for Handheld Terminals (DVB-H)", Nov 2004.
7. Alamouti, S.M., "A simple transmit diversity technique for wireless communications ," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.16, 277 no.8, pp.1451-1458, Oct 1998.
8. V. Mignone, A. Morello, G. Russo, P. Talone, "DVB-T2: la nuova piattaforma di diffusione della TV digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni, n. 3, dicembre 2008.

Ricevitori GPS per reti SFN

Analisi della stabilità a lungo termine e funzionamento in condizioni di hold over, con verifica del recupero della fase del 10 MHz

Andrea **Bertella,** Bruno **Sacco,** Mirto **Tabone**
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Carlo **Confalonieri** e Aldo **Scotti**
RaiWay - Innovazione Sperimentazione Certificazione Radioelettrica

Sommario
L'obiettivo dell'indagine illustrata in questo articolo è quello di definire un metodo per la verifica del comportamento dei ricevitori GPS utilizzati nelle reti SFN, sia nelle condizioni di funzionamento nominali che in caso di eventi, singoli o ripetuti, che portino a condizioni di Hold Over con particolare attenzione al recupero della fase del riferimento di frequenza a 10 MHz. Per ottenere questo risultato sono state necessarie parecchie settimane di prove su numerosi apparati GPS e lo sviluppo di un opportuno hardware per verificare eventuali anomalie che intercorrono durante il funzionamento in di differenti condizioni operative.

1. Introduzione

Come noto, una rete di trasmettitori DVB-T [1] operante in modalità a singola frequenza (SFN), richiede la disponibilità di un riferimento comune di tempo e frequenza sia nel punto di generazione del segnale (Head-End) che in ogni punto di emissione (trasmettitori) [2], [3], [4].

Questo in ragione del fatto che ciascun trasmettitore deve emettere il *medesimo segnale*, generato dalla modulazione digitale del *medesimo bit*, sulla stessa frequenza nel *medesimo istante di tempo*[1]. Pur essendo possibile utilizzare qualunque riferimento di tempo e frequenza, uno comunemente disponibile in qualunque punto della rete è quello fornito dal sistema GPS o da sistemi similari. I ricevitori professionali specializzati, chiamati *"GPS Timing Receivers"* o *"GPS – Disciplinated Oscillator (GPSDO)"*, forniscono il segnale di tempo, un impulso al secondo (*1 pps*), ed il riferimento di frequenza a 10 MHz ottenuto da un oscil-

1 Alcune tolleranze in tempo e frequenza sono consentite dalla tecnica stessa dell'OFDM: per esempio la diversa distanza geografica dei trasmettitori dal punto di ricezione, che darebbe come risultato un differente tempo di arrivo dei segnali al ricevitore, è assorbita dalla presenza dell'intervallo di guardia nel segnale OFDM.

latore interno al quarzo[2] controllato attraverso un algoritmo di riferimento al tempo del sistema GPS. I ricevitori GPS di questo tipo sono utilizzati in ogni sito trasmittente di una rete DVB-T operante in SFN.

Il flusso Transport Stream contenente i servizi audio, video e dati generato all'Head-End, viene "ricadenzato" dall SFN Adapter al bit-rate definito dal tipo di modulazione OFDM scelta per la trasmissione. Il segnale di clock che determina tale bit-rate è derivato dal 10 MHz locale (ad esempio, il ricevitore GPS locale).

Lo stream così generato è distribuito a ciascun sito trasmittente dove è presente un 10 MHz di riferimento locale, ricavato da un ricevitore GPS analogo a quello dell'Head-End. Di conseguenza il clock della sorgente ed il clock dei trasmettitori sono nominalmente gli stessi: sul medio/lungo termine hanno lo stesso valore in quanto riferiti alla medesima sorgente. Nel breve termine, invece, le fluttuazioni del 10 MHz all'Head-End ai vari siti trasmittenti possono non essere trascurabili: tali differenze, come ora vedremo, possono avere un impatto sul funzionamento dei trasmettitori.

In ciascun trasmettitore di una rete SFN è presente un buffer. La principale funzione di tale buffer è quella di implementare un ritardo programmabile tale da permettere al trasmettitore di emettere il segnale all'istante richiesto. Nel dimensionamento del buffer si deve tenere in considerazione il ritardo massimo introdotto dalla rete di distribuzione. Tale ritardo, nel caso DVB-T, non può comunque essere superiore al secondo in modo tale da evitare, senza l'introduzione di ulteriori complicazioni nel meccanismo di sincronizzazione come ad esempio è stato fatto per lo standard DVB-T2 [5], [6] ove il ritardo può anche essere superiore, ambiguità legate al riferimento 1pps. Un secondo, ma importantissimo scopo di tale buffer è quello di assorbire le fluttuazioni a breve termine del clock di sincronismo tra Head-End e siti trasmittenti.

Dovendo il buffer realizzare fino ad un secondo di ritardo, la memoria richiesta è alquanto grande. L'effettiva modalità di realizzazione di tale buffer dipende dalle strategie progettuali dei costruttori. Una possibilità è quella di avere due registri FIFO in cascata: il primo, asincrono, è usato per assorbire le fluttuazioni del clock tra sorgente e punto di emissione, mentre il secondo serve per realizzare il ritardo complementare a quello di rete, e deve dunque essere sufficientemente grande (nel caso DVB-T, 1 secondo). Nel caso in cui il primo buffer FIFO sia troppo piccolo per assorbire le fluttuazione presenti, si può andare incontro a condizioni di eccessivo riempimento nel caso in cui la scrittura avvenga troppo rapidamente rispetto alla lettura (overflow) o, viceversa, allo svuotamento della memoria (under flow). In tali casi, si ha una perdita di dati ed una risincronizzazione del trasmettitore **con conseguente interruzione del servizio di alcuni secondi**.

2. L'indagine sulle fluttuazioni nei ricevitori GPS

In numerose campagne di misura effettuate nei periodi successivi allo switch-off in diverse regioni italiane si è evidenziato che le risincronizzazioni, con conseguente perdita del servizio, si verificano piuttosto frequentemente[3]. Sospettando che l'entità delle fluttuazioni del riferimento ottenuto dal GPS possa procurare problemi al buffer, si è effettuata un'accurata indagine, con l'obiettivo di verificare l'entità reale delle fluttuazioni dovute ai ricevitori GPS presenti sul mercato e se possibile di trovare opportune contromisure. Per indagare sul comportamento dei buffer sarebbe stato necessario avere a disposizione in laboratorio una serie di modulatori riportanti l'indicazione della percentuale di occupazione del buffer stesso. Purtroppo tale indicazione di solito non è disponibile nei modulatori: si è quindi deciso di realizzare uno speciale analizzatore, che abbiamo chiamato *Timing Test Analyzer* (TTA) basato su FPGA (si veda il paragrafo successivo), in grado di valutare le fluttuazioni di segnali a 10 MHz rispetto ad un riferimento campione.

2 Sono anche disponibili ricevitori GPS commerciali al rubidio

3 A seconda della zona e dei trasmettitori interessati il numero di interruzioni poteva variare da alcune al giorno ad una ogni 2-3 giorni.

Il TTA consente di misurare fino a 7 segnali tempo/frequenza (ad esempio GPS) in contemporanea, rispetto ad un segnale di riferimento. In tale modo risulta semplice confrontare contemporaneamente il comportamento di più apparati in presenza di eventi perturbanti che si possono verificare in un sito trasmittente come, ad esempio, alti livelli di radiofrequenza, interferenze, emissioni spurie, parziale oscuramento della costellazione satellitare, ecc. Come ulteriore risultato di questo lavoro si è deciso di sviluppare una procedura per validare i ricevitori GPS prima del loro acquisto o della loro messa in servizio.

3. Il sistema di analisi

Il sistema TTA nasce dall'esigenza di emulare il comportamento di un buffer FIFO per ottenere un'indicazione in tempo reale della percentuale di riempimento[4].

Un registro FIFO può essere visto come una memoria dual-port, dove la porta 1 è scritta con il clock del dato in ingresso e la porta 2 è letta con il clock del dato in uscita. Un contatore binario, che incrementa ad ogni operazione di scrittura (clock di scrittura) costituisce il generatore di indirizzi di scrittura per la porta 1; un analogo contatore binario, incrementato ad ogni operazione di lettura, sul relativo clock, costituisce il generatore di indirizzi di lettura per la porta 2. Se i due clock hanno una frequenza uguale, la differenza tra contatore di scrittura e quello di lettura è costante. Se ci sono fluttuazioni reciproche rapide, ma, almeno a medio termine, le due frequenze sono mediamente uguali, la differenza di cui sopra è (mediamente) costante. Diversamente uno dei due contatori accumula un vantaggio (o svantaggio) con conseguente progressivo riempimento o svuotamento del buffer che può determinare condizioni di overflow o under flow, e perdita di dati.

Per emulare il comportamento di un tale buffer, al solo fine di monitorare il livello di riempimento, non è necessaria la memoria, ma solamente i due contatori, e un blocco sottrattore che calcoli in tempo reale la differenza dei due valori. Si è in realtà adottata una ulteriore semplificazione: è stato utilizzato un singolo contatore del tipo up/down, pilotato da una logica di controllo che gestisce il verso del conteggio ed eventi concomitanti[5].

Il contatore up/down viene resettato all'inizio del test ed il valore accumulato assume il significato di *buffer margin loss*. Infatti, se in una normale utilizzazione del buffer questo viene caricato al 50% per avere uguale margine iniziale nei due sensi, il margine assume valori positivi o negativi a seconda che il clock del dispositivo in test sia più veloce o più lento del clock di riferimento. Utilizzando un segnale a 10 MHz la variabile margine sarà espressa in cicli a tale frequenza, ovvero in passi da 100 ns. Un altro significato fisico del valore del conteggio è la differenza di fase tra segnale e riferimento, accumulata dall'inizio del conteggio (reset del contatore).

Operativamente, nella FPGA ciascuno dei 7 ingressi dei segnali analogici a 10MHz provenienti dai dispositivi in test viene digitalizzato tramite sovra campionamento e filtrato digitalmente tramite filtro FIR per rimuovere l'eventuale rumore presente. Quindi viene inviato ad un rivelatore a soglia il cui impulso alimenta l'ingresso 1 di ciascun contatore up/down prima menzionato. Analogamente l'ingresso comune viene utilizzato per il clock di riferimento, che subisce il medesimo trattamento di filtraggio di cui sopra, ed alimenta l'ingresso 2 di tutti i contatori di up/down dei 7 ingressi di prova.

Un sistema di verifica di violazione della temporizzazione[6] (perdita di colpi di clock per simultaneità di arrivo dei segnali di lettura e scrittura) è stato implementato per ciascun canale.

Il valore di ciascun contatore, rappresentante il

4 A tutti gli effetti, comunque, il TTA evidenzia l'andamento temporale della fase di ciascun segnale, accumulata da un dato inizio dei tempi.

5 In caso di simultaneità del Clock#1 (incremento del contatore) e del Clock#2 (decremento) il valore del contatore non viene modificato. Il contatore è stato definito come *signed fixed-point variable* in modo tale da poter assumere anche valori negativi.

6 Durante i test effettuati non sono state rilevate violazioni di timing

buffer margin loss istantaneo, viene letto ad una cadenza desiderata, ad esempio una volta al secondo, ed il dato viene memorizzato in un file di log su di un computer esterno, assieme al riferimento temporale (data e ora) di tale lettura.

Come sistema di riferimento è bene utilizzare una macchina di elevata stabilità e precisione, come ad esempio un oscillatore al Rubidio o al Cesio, in funzionamento libero (*free run*), che sia riferita ad un campione primario e sulla quale sia stata valutata la deriva, sul breve e sul lungo periodo, espressa in parti al secondo. Tale valore di deriva viene utilizzato per compensare i risultati è renderli più facilmente leggibili.

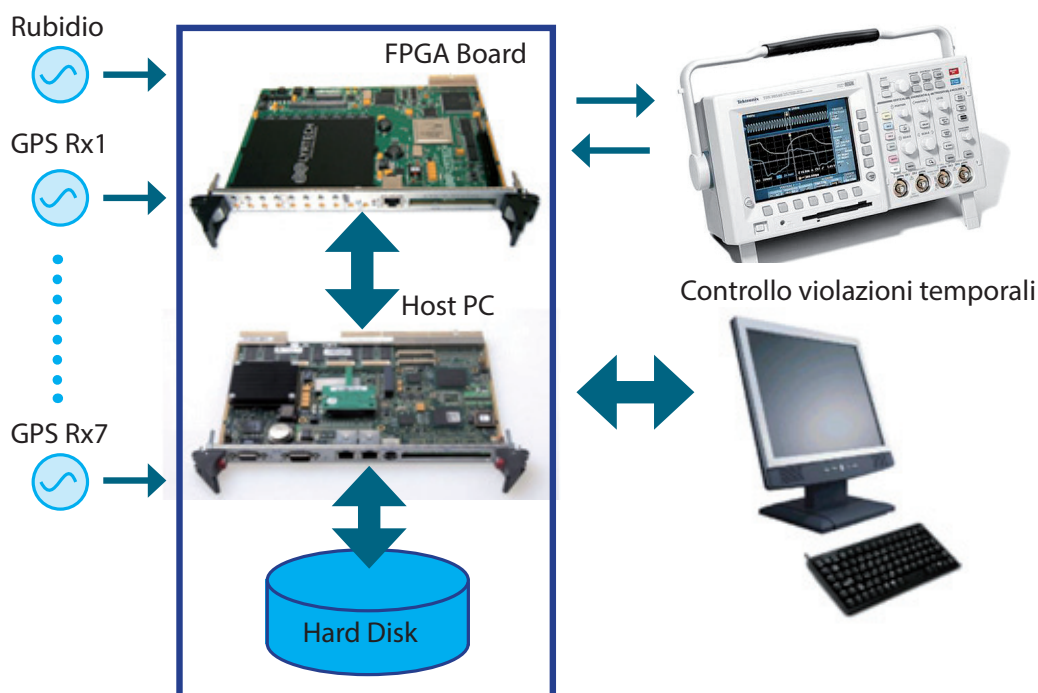
I risultati delle sessioni di test vengono infine elaborati tramite un programma scritto in LabView, per filtrare i dati se richiesto, per compensare, quando necessario, la deriva lineare e per visualizzare la fluttuazione del margine nel tempo.

4. I test di lungo periodo

4.1 Test preliminari

E' stato predisposto un test preliminare di lungo periodo per ottenere informazioni sui possibili problemi connessi alla procedura di misura. Per fare ciò sono stati considerati solo due ricevitori GPS, utilizzando dapprima l'uno come riferimento dell'altro. Ovviamente, così facendo, in caso di fluttuazioni risulta impossibile individuare quale dei due ha evidenziato i problemi, ma ciò non era di interesse in questa fase preliminare. Inoltre al fine di rendere più critico il test sono state collocate le antenne riceventi dei due ricevitori GPS in modo da avere una limitata visibilità del cielo. Il test preliminare è iniziato il 14 settembre 2011 e si è concluso al 4 ottobre 2011.

Il file di log ha permesso di evidenziare diversi aspetti. Il *buffer margin loss* atteso dovrebbe essere mediamente nullo con fluttuazioni di breve periodo; si notano invece alcuni salti permanenti che evidenzia-

Fig. 1 - Diagramma a blocchi del sistema di analisi.

no un accumulo di fase in una direzione che non viene mai recuperata. Questo fatto è un campanello di allarme per applicazioni come quelle del DVB-T in SFN, dove, come accennato, il buffer può andare in overflow o in underflow.

In figura 2 sono visibili alcuni eventi rilevati durante il test.

Questi salti sono certamente l'effetto di altrettanti hold-over mantenuti per un certo periodo di tempo da uno o entrambi i ricevitori GPS a causa della mancanza di informazioni dai satelliti della costellazione. La ragione di questo hold-over non è stata investigata a fondo in quanto l'obiettivo della verifica preliminare era quello di mettere a punto il sistema di rilevazione, anche se è presumibile un problema di visibilità oppure di interferenza sulla frequenza di ricezione del GPS. In ogni caso tale situazione si è rivelata di grande utilità per proseguire nella sperimentazione, in quanto ha confermato il sospetto che – almeno in alcuni apparati - la fase del riferimento non venga recuperata.

Fig. 2 - Test preliminare. Eventi registrati il 21-09-2011.

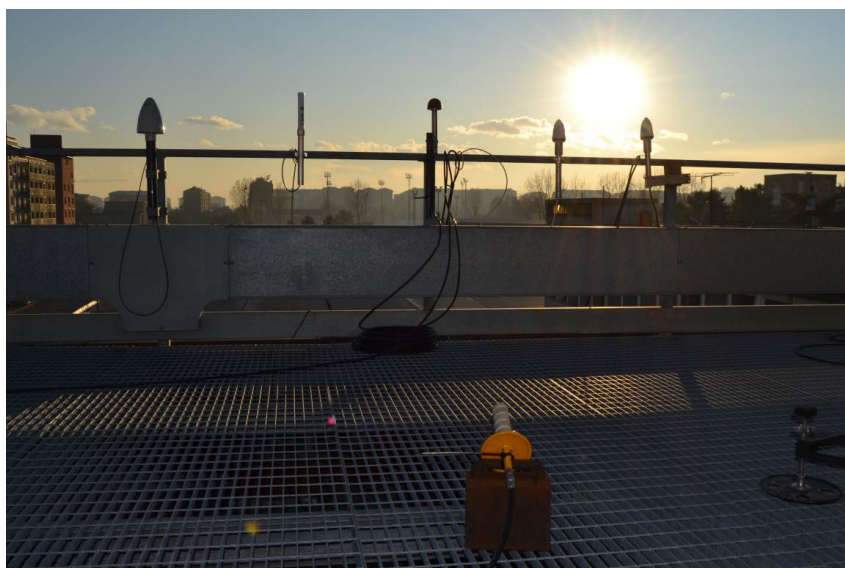



Fig. 3 - Le cinque antenne dei ricevitori GPS in prova. L'antenna passiva ad elica usata per l'interferenza locale è visibile in basso.

4.2 Test di lungo periodo

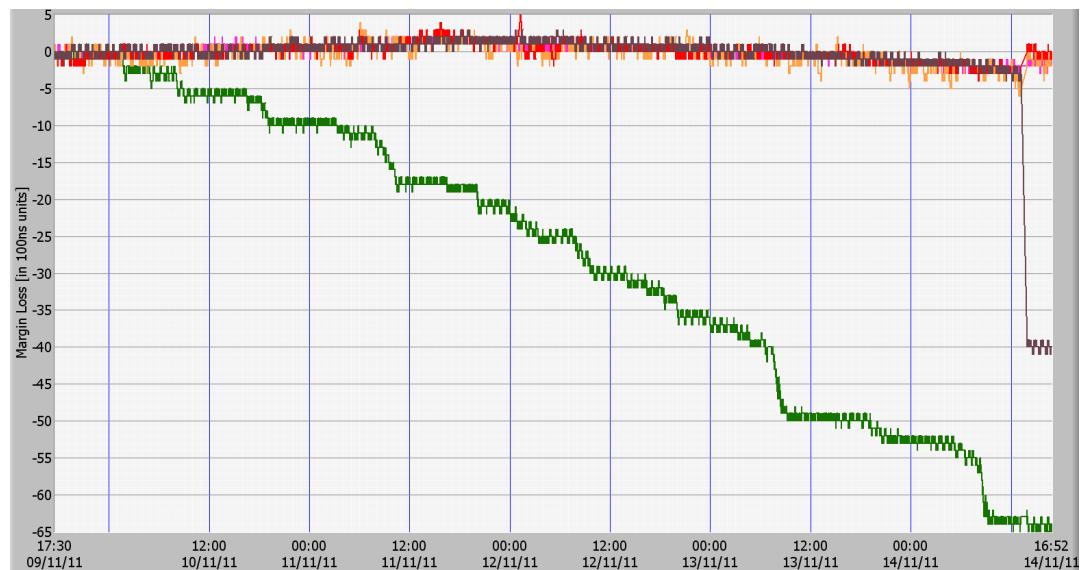
Il test di lungo periodo vero e proprio ha avuto inizio il 9 novembre ed è terminato il 5 dicembre 2011 per una durata complessiva di 25 giorni.

Le condizioni di test erano le seguenti:

- 5 ricevitori GPS monitorati contemporaneamente;
- Adozione come riferimento di un oscillatore al rubidio operante in modo *free run*;
- Antenne GPS collocate sul terrazzo dell'edificio con un'ampia visibilità di cielo (figura 3);
- *Warm up* dei ricevitori GPS: 4 giorni.

4.3 Risultati del test di lungo periodo

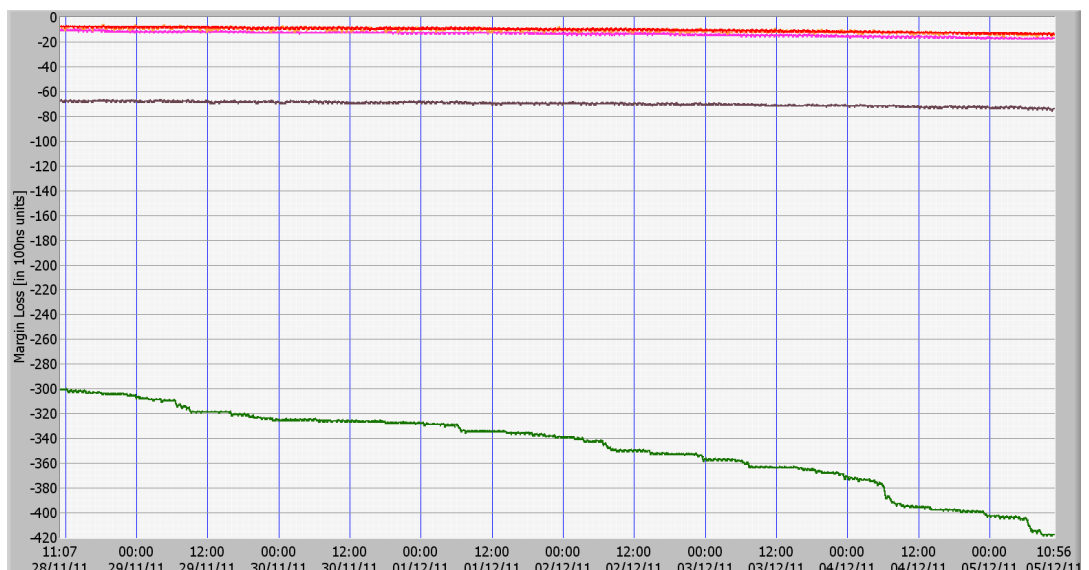
I file di log del test di lungo periodo sono stati elaborati tramite un programma scritto in LabView, che permette il filtraggio (se richiesto), e la rimozione della componente lineare della deriva del riferimento. Infatti, dato che il generatore al rubidio era operante in modo *free run*, una leggera deriva rispetto al *timing* del sistema globale

Fig. 4 - Il segmento iniziale, della durata di 5 giorni, del test a lungo termine. Si osserva che l'apparato relativo alla curva verde accumula sistematicamente piccoli salti di fase. L'apparato relativo alla curva marrone ha evidenziato un salto di fase non recuperato il 14/11/2012 alle ore 13 circa. Gli altri apparati hanno avuto un comportamento migliore.

GPS era prevedibile, ed è infatti stata riscontrata. La componente di primo ordine di tale deriva è stata compensata da software: il valore empirico che ne è risultato è pari a $-3.412*10^{-11}$ [sec/sec]. Una volta compensata tale deriva, le cinque curve dei ricevitori sono risultate avere mediamente il trend orizzontale atteso; una leggera curvatura è ascrivibile alla componente di secondo ordine della deriva, che non è stata compensata (figura 4).

I risultati in sintesi sono stati i seguenti:

- 3 apparati hanno mostrato un funzionamento regolare nei 25 giorni di osservazione;
- Un apparato ha evidenziato un paio di salti di fase, non recuperati;
- Un apparato ha mostrato un continuo spostamento a piccoli step, accumulando un errore di fase di circa -420 cicli di clock a 10 MHz, corrispondenti a -42µs, nei 25 giorni di osservazione (figura 5).

I risultati indicano che in condizioni di buona visibilità dei satelliti ed in assenza di interferenze, situazione ben rappresentata nel test, un "buon" ricevitore GPS è in grado di fornire un 10 MHz senza accumulare scostamenti di fase.

Fig. 5 - Ultima parte del test a lungo termine. Lo scarto di fase accumulato dall'apparato relativo alla curva verde è di circa -420 cicli di clock a 10 MHz, corrispondenti a -42µs, nei 25 giorni di osservazione. Quello relativo alla curva marrone -60 cicli (-6µs).

5. Test con interferenza a radiofrequenza

L'ambiente elettromagnetico tipico di un sito trasmittente è spesso molto avverso, a causa della presenza di numerosi segnali forti a radiofrequenza. In un tale contesto la ricezione di segnali deboli come quelli ricevibili dai satelliti GPS non sempre può essere garantita nel tempo. Infatti l'antenna di un sistema ricevente GPS può essere interessata dall'interferenza di componenti spettrali armoniche dovute ai trasmettitori locali. Per esempio la terza armonica del canale televisivo 27 in UHF, pur rispettando la maschera prevista dalla normativa ETSI per quanto riguarda le emissioni non essenziali, può compromettere la ricezione della frequenza 1575.42 MHz di un'antenna GPS non opportunamente collocata. Lo stesso dicasi per la seconda armonica del canale 60 UHF. Inoltre, teoricamente, anche le componenti di intermodulazione derivanti da elementi non lineari[7] che si generano localmente, potrebbero dar luogo a problemi non facilmente valutabili a priori (onde di combinazione).

Di conseguenza è possibile che in un sito trasmittente le interferenze possano disturbare il normale funzionamento di un ricevitore GPS. Una contromisura potrebbe essere la collocazione dell'antenna GPS in una posizione maggiormente schermata rispetto alle interferenze elettromagnetiche, ma talvolta ciò comporta una peggior visibilità della costellazione dei satelliti GPS.

Per valutare il comportamento di un ricevitore GPS in presenza di interferenze è stata aggiunta un'ulteriore antenna (passiva) in banda L collocata in prossimità di quelle dei ricevitori GPS sul medesimo terrazzo (si veda figura 3).

Il segnale utilizzato per la generazione delle interferenze è una portante a 1575,42 MHz modulata digitalmente con un segnale digitale avente larghezza di banda di 2 MHz, ed è stato ottenuto da un generatore di segnali vettoriale (Anritsu MG3700A).

Il livello di potenza in RF del segnale disturbante è stato mantenuto al valore minimo necessario per oscurare la ricezione dei ricevitori sotto test ma tale da non disturbare altri ricevitori GPS eventualmente presenti nella zona.

I test di interferenza in RF sono stati effettuati generando il segnale interferente per un dato intervallo di tempo e quindi valutando il "margine" durante quell'intervallo e nel periodo immediatamente successivo. In un totale di diciannove test, con durate che variano da un'ora ad un intero fine settimana, si sono osservati i comportamenti durante il periodo di hold-over e nel periodo successivo al riaggancio.

5.1 Risultati dei test con interferenza a radiofrequenza

Per ciascuno dei sei test di interferenza è stato generato un grafico multitraccia. In figura 6 è riportato a titolo di esempio il test interferenziale numero 3. L'andamento del grafico non presenta particolari sorprese: quando il ricevitore perde le informazioni di sincronizzazione proveniente dai satelliti GPS, l'oscillatore interno viene lasciato libero (*free run*). In questa situazione la frequenza può derivare in qualsivoglia direzione in dipendenza di diversi fattori: caratteristiche proprie del quarzo utilizzato, temperatura, stato della correzione al momento dell'hold-over, software di gestione dell'hold-over specifico dell'apparato, ecc.

Dalla figura 6 si può inoltre osservare come il "margine" accumulato durante l'hold-over non venga recuperato: le curve infatti non tornano nella posizione originaria, quella cioè in cui si trovavano prima della condizione di hold-over, ma ritornano semplicemente ad essere piatte, ad indicare che il ricevitore GPS ha recuperato la corretta frequenza di funzionamento.

L'hold-over visualizzato in figura 6 ha una durata di 17 ore. Si tratta dunque di un evento di durata estremamente elevata, che di norma non dovrebbe accadere. Il fatto che nessun apparato non recuperi

7 E' noto dall'esperienza pregressa che bulloni ossidati o altri componenti strutturali dei tralicci possono comportarsi da componente elettrico non-lineare e generare prodotti di intermodulazione, specialmente in siti dove vengono usate strutture radianti (onde medie).

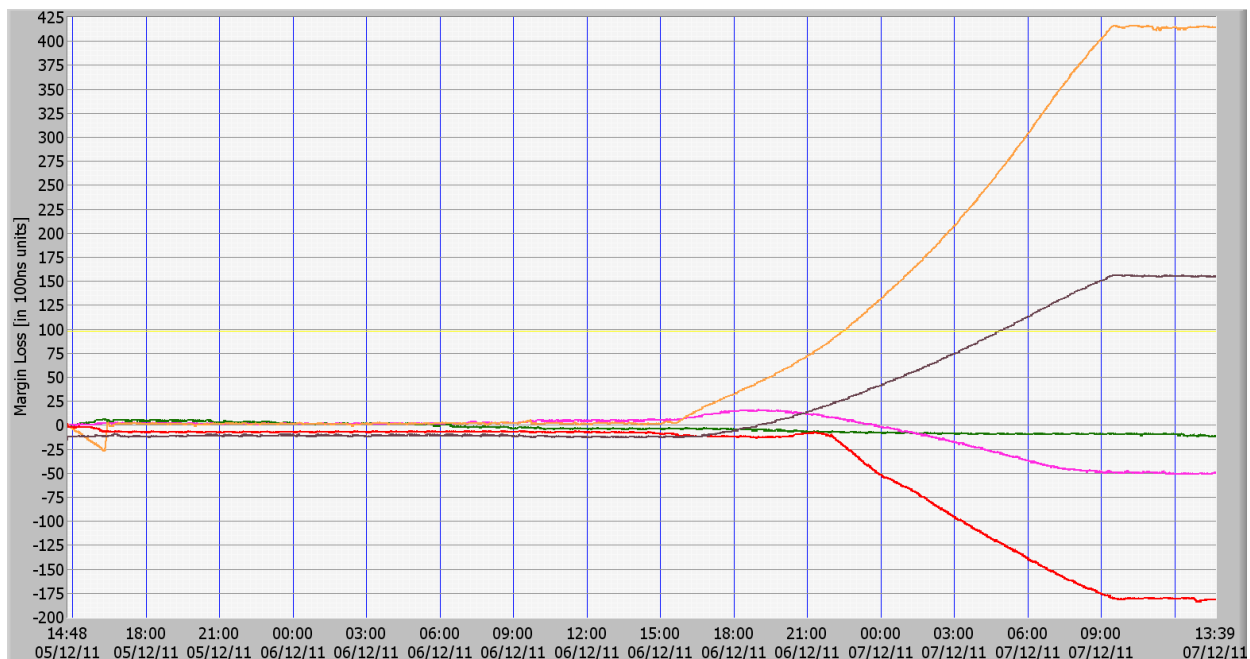



Fig. 6 - Hold Over della durata di 17 ore. Si nota che nessun apparato recupera la fase.

la fase è giustificato in questi casi: a seguito di un prolungato periodo di *free-run*, sarebbe incauto presumere che l'oscillatore interno non abbia deviato così tanto da portare il trasmettitore DVB-T fuori dalle condizioni di sincronizzazione. E'dunque una misura di cautela quella di mandare in *mute* il trasmettitore fino al ripristino del riferimento GPS. A questo punto, sarebbe inutile ricuperare la fase del 10 MHz: l'oscillatore viene messo sempicemente in passo così come il contatore che genera il segnale 1PPS che viene resettato. In generale quindi il recupero della fase non viene attuato quando, superate determinati tempi di hold-over, solitamente impostabili dall'operatore, viene inibito il segnale dell'1pps (*1 pps muting*).

La questione è diversa se gli hold-over sono brevi, anche se ripetuti. In questo caso la deriva dell'oscillatore è limitata, e deve essere considerata "gestibile".

Test di interferenza brevi e ripetuti permettono dunque di valutare il comportamento dei ricevitori GPS sotto differenti aspetti:

a. l'efficacia del recupero della fase;
b. la velocità di recupero della fase;
c. il comportamento in Hold Over.

La successiva figura 7 riporta una serie di tre holdover brevi, ed è significativa riguardo questi aspetti. Dall'osservazione delle curve si evidenza che l'apparato relativo alla curva marrone recupera sempre e correttamente la fase; quello relativo alla curva arancione recupera la fase, ma non al terzo evento (la deviazione era probabilmente eccessiva); l'apparato relativo alla curva rossa non recupera la fase, (anche se durante il secondo evento il verso della deriva del suo oscillatore è tale da compensare parzialmente lo scarto accumulato durante il primo evento).

Il tratto di una determinata curva che descrive il recupero della fase è importante, perché quantifica il valore di deviazione di frequenza utilizzato sul quarzo per attuare il recupero. La pendenza del tratto infatti ci rivela in quanto tempo vengono recuperati i cicli di clock relativi alla deriva. Il rapporto tra numero di tali cicli e tempo impiegato a recuperarli è la deviazione di frequenza cercata.

Ad esempio, in figura 7, alle ore 16:53 del 31/1/2012, la curva marrone recupera 46 cicli di clock da 10MHz,

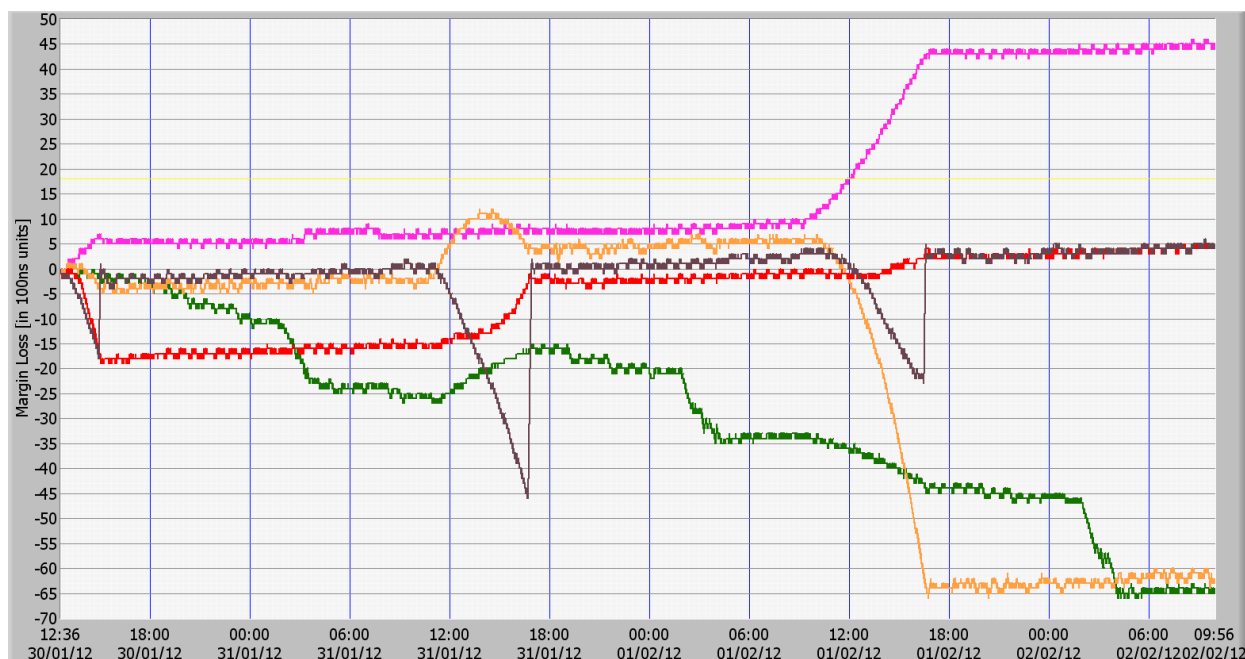



Fig. 7 - Sequenza di tre hold-over brevi. Si nota il diverso comportamento degli apparati.

in 13 minuti. La deviazione di frequenza risulta dunque:

$$\Delta f = \frac{46}{13 \cdot 60} = 0.06 \text{ Hz}$$

Questo valore deve essere moderato, in quanto la portante RF del modulatore viene ottenuta per sintesi di frequenza a partire dallo stesso riferimento a 10 MHz. Quindi una data deviazione a 10 MHz produce una deviazione del valore della frequenza portante secondo il rapporto frequenza RF / 10 MHz.

Il caso peggiore è quello del canale UHF più alto (canale 60, considerando il Dividend dell'LTE [7]) in cui la portante RF è 786 MHz. In questo caso la deviazione che si avrebbe è:

0.06 Hz * 786 / 10 = 4.7 Hz.

La tolleranza su questa frequenza è indicata nella norma ETSI TR 101 190 (paragrafo 8.3.1) [8]: si parla di un errore di frequenza massimo di un millesimo della spaziatura delle sottoportanti OFDM, quindi, nel caso FFT = 8k, circa 1 kHz/1000 = 1 Hz. Il valore rilevato dalla curva marrone, dunque, sarebbe già eccessivo: occorrerebbe che il ricevitore GPS attuasse la procedura di recupero della fase in un tempo quintuplo.

6. Sommario delle funzionalità di un timing-receiver GPS: quelle generiche, e quelle specifiche per applicazioni broadcasting

A questo punto è opportuno tirare le somme, e chiarire cosa fa e cosa dovrebbe fare un *timing receiver GPS*.

Per prima cosa: come funziona un *timing receiver GPS*? La risposta non è semplice, forse nemmeno univoca. Ogni produttore può decidere di implementarlo secondo propri criteri. Cerchiamo comunque di riassumere per punti come opera un *timing receiver GPS* per applicazioni generiche:

- L'apparato contiene un modulo radio che riceve dalla costellazione di satelliti i segnali GPS, li demodula, estrae le informazioni di *timing*, risolve le relative equazioni, e ottiene le informazioni di posizione geografica e tempo. Per l'applicazione

specifica di *timing receiver*, la posizione geografica è fissa, quindi viene rilevato solo il tempo (è necessario un minor numero di satelliti in vista, in linea di principio, uno solo).

- Un oscillatore a quarzo interno viene utilizzato per fornire in uscita un segnale a 10 MHz (riferimento di frequenza) e tale segnale viene diviso per 10^7 per ottenere un segnale in uscita da 1 Hz (riferimento di tempo, "1pps"). Il divisore viene all'inizio resettato per allineare il segnale 1pps allo "scoccare del secondo" del tempo GPS.
- L'oscillatore a quarzo viene disciplinato (ovvero asservito alla cadenza alla quale sono disponibili le informazioni di timing) in modo che il risultante segnale ottenuto dalla divisione, 1pps, continui a risultare allineato al "secondo" del GPS. Ciò garantisce, ovviamente, che a sua volta il 10 MHz sia agganciato al riferimento 10 MHz del "sistema globale" GPS.
- Ne risulta un 10 MHz locale che è agganciato, a medio-lungo termine, ma può avere fluttuazioni a breve-medio termine.
- In caso di mancanza o insufficiente qualità del segnale satellite, il *timing receiver* sospende il disciplinamento del quarzo (condizione di hold-over); la frequenza del 10 MHz locale, e di conseguenza del segnale 1pps, potrà quindi evidenziare una deriva, di entità poco prevedibile, tanto maggiore quanto più lungo è l'hold-over. La deriva dipenderà da fattori esterni (es.: temperatura) e interni (qualità del quarzo, tensione di controllo iniziale).

Oltre ai punti sopra elencati, un timing receiver GPS *per applicazioni broadcasting* deve implementare anche alcune importanti funzioni aggiuntive:

- Durante un hold-over, se una certa durata limite, presettabile, è stata raggiunta, il *timing-receiver* decide che la deriva della frequenza del quarzo locale (stimabile, ma non misurabile durante l'hold-over!) potrebbe aver raggiunto un valore tale per cui il segnale 1pps abbia derivato di un valore limite prestabilito[8]. In questo caso il sistema deve notificare[9] l'evento al trasmettitore che provvederà a spegnere la portante per evitare una situazione interferenziale grave.
- A seguito di un hold-over, l'errore di fase accumulato dal quarzo deve essere ricondotto a zero, con una procedura di rifasamento che prevede che il quarzo subisca una deviazione nel verso opposto, fino al raggiungimento della fase zero. Tale deviazione deve essere limitata per evitare che la frequenza della portante del trasmettitore vada fuori specifica. In pratica la velocità di recupero dall'hold-over dovrà essere limitata e tipicamente pari a $1x10^{-9}$ sec/s (si veda ETSI TR 101 190, paragrafo 8.3.1).

7. Conclusioni

I risultati del presente lavoro si sono dimostrati di grande utilità, da un lato per confermare che in condizioni di funzionamento nominali (disponibilità del segnale satellitare GPS di buona qualità) la fase del 10 MHz e di conseguenza la fase del segnale 1pps rispettano ampiamente le indicazioni della normativa sul DBV-T, dall'altro per verificare che, come si sospettava, in condizioni di mancanza del segnale GPS, anche per brevi periodi di tempo, il comportamento dei vari apparati è estremamente dipendente all'implementazione del costruttore senza mai dare i riscontri attesi.

Ciò ha permesso di predisporre una procedura, idonea a qualificare un ricevitore GPS adatto per una rete SFN DVB-T per quanto concerne il comportamento del 10 MHz in mancanza del segnale di sincronizzazione GPS, il cosiddetto funzionamento in hold-over. Un apparato rispondente ai contenuti della procedura dovrebbe permettere l'eliminazione delle microinterruzioni dovute a tali cause.

Tali requisiti si aggiungono a quelli standard già previsti nei capitolati.

8 per un DVB-T modalità 8k, tg ¼ usata normalmente per reti SFN di grandi dimensioni, il margine è stabilito in ±5 μs (si veda ETSI TR 101 190, paragrafo 5.2.4).

9 Muting segnale 1pps

Bibliografia

1. ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01), "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_60/en_300744v010601p.pdf
2. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre", Elettronica e Telecomunicazioni n.1 Aprile 2002
3. A. Bertella, B. Sacco, M. Tabone, "Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T", Elettronica e Telecomunicazioni n.1 Aprile 2002
4. A. Bertella, B. Sacco, M. Tabone "Reti SFN DVB-T: Q&A (tutto quello che avresti voluto sapere sui trasmettitori SFN e non hai mai osato chiedere...)" – Elettronica e Telecomunicazioni n.2 Agosto 2008
5. ETSI EN 302 755 V1.1.1 (2009-09), "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.01.01_60/en_302755v010101p.pdf
6. A. Bertella, V. Mignone, B. Sacco, M. Tabone, "Il digitale terrestre di seconda generazione", Elettronica e Telecomunicazioni n.2 Agosto 2009
7. D. Milanesio, B. Sacco, V. Sardella, "LTE e DTT: Effetti dei segnali per la telefonia mobile di 4a generazione sugli attuali impianti dantenna televisivi", Elettronica e Telecomunicazioni n.3 Dicembre 2011
8. ETSI TR 101 190 V1.3.1 (2008-10), "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects", www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101100_101199/101190/01.03.01_60/tr_101190v010301p.pdf

"Elettronica e Telecomunicazioni",
nata nel 1952 come "Elettronica e Televisione Italiana", è una rivista quadrimestrale di Rai Eri realizzata dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai, sul cui sito è disponibile gratuitamente dal 2001.

Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica (CRIT) della Rai nasce a Torino nel 1930 come "Laboratorio Ricerche" e dal 1960 ha sede in Corso Giambone 68. Successivamente assume la denominazione "Centro Ricerche" e, dall'ottobre 1999, quella attuale.
L'attività del Centro è coordinata dalla Direzione Strategie Tecnologiche.
Alla nascita, tra i suoi obiettivi ha la progettazione e realizzazione di impianti ed apparati di nuova concezione, non reperibili sul mercato. I profondi cambiamenti nello scenario delle telecomunicazioni hanno stimolato la trasformazione del Centro.
Ha ricevuto riconoscimenti a livello internazionale per i contribuiti forniti alle attività di studio e normalizzazione dei sistemi per la codifica dei segnali audio e video in forma digitale, allo sviluppo delle tecniche di compressione dei segnali attualmente alla base dei sistemi di trasmissione e registrazione dei segnali video, alla definizione degli standard di diffusione e trasmissione DVB.
Il Centro contribuisce all'evoluzione delle tecnologie relative al sistema radiotelevisivo e multimediale e supporta il Gruppo nelle scelte di indirizzo tecnologico e nella fase di sperimentazione e introduzione in esercizio di nuovi prodotti e sistemi. E' attivo in numerosi progetti finanziati in ambito europeo e nazionale e collabora con Università e Industrie per l'attività di ricerca, per la definizione dei nuovi standard e lo sviluppo dei nuovi servizi.

Rai Radiotelevisione S.p.A.
Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica
Corso E. Giambone, 68 - I 10135 Torino
www.crit.rai.it